

Studijní program: M 2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303 T 002 – Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

**Technická analýza možné náhrady karbonitridace procesem
sulfonitridace s cílem snížení pasivních odporů a zvýšení životnosti**

*Technical analysis of possibility to replace the carbonitriding with sulfonitriding
process to reduce the frictional resistances and increase the service life.*

KMT – 244

Marcin Szkudlarek

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

Konzultant diplomové práce: Dr.inž Robert Pietrasik

Liberec 2008



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní rok: 2007/08

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Marcin SZKUDLAREK
Studijní program	M2301 Strojní inženýrství
obor	2302 T 002 Strojírenská technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

**Technická analýza možné náhrady karbonitridace procesem
sulfonitridace s cílem snížení pasivních odporů a zvýšení životnosti**

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle magisterské práce a doporučené metody pro vypracování)

Zásady pro vypracování:

1. V teoretické části se seznámte s vhodnými procesy chemicko-tepelného zpracování a druhů opotřebení.
2. Proved'te posouzení sulfonitridace z technických, ekonomických a ekologických hledisek. Navrhněte metody měření pasivních odporů a opotřebení u konkrétního dílu převodovky.
3. Proved'te karbonitridaci a sulfonitridaci vybraných dílů. Na získaných površích proved'te hodnocení mechanických a tribologických vlastností a metalografický rozbor.
4. Získané výsledky vyhodnot'te a doporučte další postup.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 40 – 50 stran
- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu)

- [1] LAWRONSKI, Z.: Tarcie, zuzywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993
- [2] KULA P. Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie. Wyd. Politechniki Lodzkiej, Łódź 2002
- [3] SZCZEREK, M., Wiśniewski, M. Tribologia i tribotechnika. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000
- [4] GJULIHANDANOW, J.L., BUDZYNOWSKI, T.W.: Naweglanie, wegloazotowanie, azotowanie stali : zagadnienia wybrane. Wydaw. Politechniki Radomskiej, 2003.
- [5] GAWRONSKI, Z.: Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych. Monografie. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2005

Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

doc. Ing. Franiek Stuchlík, CSc.
Dr Ing. Robert Pietrasik

L.S

doc. František STUHLÍK, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31.03.2008

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Františku Stuchlíkovi a také Dr. Ing. Robertu Pietrasikovi za čas mně věnovaný a za drahocenné pokyny týkající se mé magisterské práce. Rovněž chci poděkovat Mgr. Ing. Damianu Batoremu, Dr. Ing. Jacku Grabarczykowi, Mgr. Ing. Zbigniewu Rożkowi, Mgr. Ing. Mateuszovi Fijałkowskiemu za pomoc a cenné rady při realizaci zkušební části práce. Obzvláště děkuji své rodině za podporu během vypracovávání této práce.

Anotace

Práce se zabírala modifikací povrchů chemickotepelným zpracováním na připravených součástech převodové skříně MQ 200 za účelem provedení analýzy možnosti zastoupení karbonitridovaného zpracování procesem sulfonitridace.

V teoretické části byly popsány typické procesy chemickotepelného zpracování a rovněž formy úbytků vystupující během vzájemné spolupráce součástí strojů. Rovněž se zabírala hodnocením sulfonitridace z technického, ekonomického a také ekologického hlediska. V experimentální části byla provedena charakteristika získaných vrstev s použitím následujících zkušebních technik: optická mikroskopie, rentgenová mikroanalýza, měření mikrotvrdosti a také tribologické zkoušky metodou Pin-On-Disc. Získané výsledky zkoušek byly představeny v podobě fotografií, grafů a zároveň tabulek.

Klíčová slova: tribologie, chemicko-tepelné zpracování, sulfonitridace, karbonitridace

Annotation

In the thesis the modification of surface through thermal-chemical treatment on final elements of MQ 200 gear box to carry out the analysis of possibility to replace the carbonitriding with sulfonitriding process is undertaken.

In the theoretical part the typical processes of thermal-chemical treatments and the wear model arising during machine elements' mating are described. There is also the evaluation of sulfonitriding from technical, economical and ecological point of view brought up. In the experimental part the characteristics of obtained layers by using of following testing techniques: optical microscopy, X-ray microanalysis, microhardness measurements and tribological tests using the Pin-On-Disc method is carried out. The obtained test results are shown in a form of pictures, diagrams and tables.

Keywords: tribological, thermal chemical treatment, carbonitriding, sulfonitriding

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

R_e	-	Mez kluzu
Q	-	tepelný impuls
γ'	<i>Ang. iron nitride Fe_4N</i>	Nitrid železa Fe_4N
ϵ	<i>Ang. iron nitride $Fe_{2-4}N$</i>	Nitrid železa $Fe_{2-4}N$
$^{\circ}C$	<i>ang. Celsius</i>	Stupeň Celsia
FeS	<i>ang. Iron sulfide</i>	Sirník železnatý
%	<i>ang. Percent</i>	Procento
h	<i>ang. Hour</i>	Hodina
C	<i>ang. Carbon</i>	Uhlík
$BaCO_3$	<i>ang. Barium carbonate</i>	Uhličitan barnatý
$CaCO_3$	<i>Calcium Carbonate</i>	Uhličitan vápenatý
Na_2CO_3	<i>Sodium Carbonate</i>	<i>Uhličitan sodný</i>
CH_4	<i>ang. Methane</i>	Methan
NH_3	<i>ang. Ammonia</i>	Čpavek
HV	<i>ang. Vickers hardness</i>	Tvrдость podle Vickerse

Obsah

Úvod.....	9
-----------	---

I. Teoretická část

1.1. Druhy a podoba opotřebení.....	10
1.1.1. Oxidační opotřebení	10
1.1.2. Vodíkové opotřebení.....	11
1.1.3. Abrazivní opotřebení.....	12
1.1.4. Únavové opotřebení	13
1.1.4.1. Pitting.....	14
1.1.4.2. Spalling	16
1.1.5. Adhezní opotřebení	17
1.1.6. Zadírání.	18
1.2. Technologie chemicko - tepelného zpracování	19
1.2.1. Cementování	19
1.2.1.1. Cementování v sypkém prostředí	19
1.2.1.2. Cementování v kapalném prostředí	20
1.2.1.3. Cementování v plynném prostředí.....	21
1.2.1.4. Vakuové cementování.....	21
1.2.2. Nitridování	23
1.2.2.1. Nitridování v plynu – NITREG	23
1.2.2.2. Vakuové nitridování	25
1.2.2.3. Plazmové nitridování	26
1.2.3. Karbonitridování.....	27
1.2.3.1. Karbonitridování ve vysokých teplotách	28
1.2.3.2. Karbonitridování v nízkých teplotách.....	29
1.2.4. Sulfonitridace.....	29
1.2.4.1. Ekonomické, technické a ekologické aspekty technologie plynové sulfonitridace.....	32
1.3. Převodová skříň MQ 200.....	33
1.3.1. Konstrukce a pravidla fungování synchronizátora.	34

II Experimentální část

2.1. Zkušební metodika.....	35
2.1.1. Zkušební materiál.....	36
2.1.2. Popis pracovišť chemicko-tepelného zpracování.....	38
2.1.3. Pracoviště metalografických zkoušek.....	37
2.1.4. Pracoviště měření mikrotvrdosti	38
2.1.5. Pracoviště tribologických zkoušek.....	38
2.1.6. Pracoviště rentgenové mikroanalýzy.	39
2.1.7. Návrh pracoviště měření opotřebení jádra synchronní spojky.....	40
2.2. Výsledky zkoušek.....	41
2.2.1. Parametry zadané během procesu usazování vrstev.....	41
2.2.2. Charakteristika získaných vrstev.	42
2.2.2.1. Makroskopické a metalografické zkoušky	42
2.2.2.2. Kvalitativní rentgenová mikroanalýza karbonitridovaného a sulfonitridovaného povrchu	45
2.2.3. Zkoušky tvrdosti	46
2.2.4. Tribologické zkoušky	47
III. Diskuze výsledků	50
IV. Závěry.....	51
V. Zeznam obrázku a tabulek	52
VI. Použitá literatura.....	54



Úvod

Máme možnost zpracování technologické povrchové vrstvy s použitím různých technologických postupů, takových jako kalení, cementace, nitridace, sulfonitridace, karbonitridace, atp. Použitím výše uvedených tepelných a chemicko-tepelných zpracování získáváme značné zlepšení únavové pevnosti včetně zvětšení odolnosti proti opotřebení s přičiněním k prodloužení životnosti dané součásti [1,2]. Nyní se metody tepelného a chemicko-tepelného zpracování neustále rozvíjejí zaváděním na trh čím dál novějších zařízení k provádění tepelných a chemicko-tepelných procesů, získáváje tímto způsobem lepší technologické vlastnosti povrchových vrstev. Ve výběru vhodného procesu chemicko-tepelného zpracování musíme mít na zřeteli mnoho podstatných faktorů nejenom zlepšujících vlastnosti povrchu, ale také ekologické a ekonomické otázky. Stále častěji se zastupují procesy chemicko-tepelného zpracování prováděné v tuhém prostředí (prášcích, pastách) nebo koupelích procesy probíhajícími v plynném prostředí (řízených atmosfér). Toto způsobují ekonomické, technologické a především ekologické faktory. Ekonomická hlediska se budou rozvíjet hlavně ve směru snížení energetické náročnosti procesů. Technologická hlediska zahrnují provádění zkoušek a analýz ve směru získávání stále modernějších obměn technologií chemicko-tepelného zpracování. Důležitým faktorem je rovněž možnost hermetizace technologických procesů, co má vliv na omezení jejich působnosti na životní prostředí a také odstranilo nutnost zpracování technologických odpadů. Tradiční metody tepelného zpracování vzhledem k vysoké energetické, materiálové a pracovní náročnosti budou vyřazeny nebo modernizovány. Nejnovější technologie tepelného a chemicko-tepelného zpracování budou neustále modernizovány tak, aby bylo možno získávat čím jak nejlepší provozní vlastnosti obrobků, s použitím optimálních procesů z hlediska energetické, materiálové a pracovní náročnosti [3]. V představené práci byla provedena technicko-ekonomická analýza možnosti zastoupení karbonitridovaného zpracování procesem sulfonitridace na konkrétních částech převodové skříně za účelem zmenšení třecích odporů a zvýšení životnosti. Technologie sulfonitridace byla vypracována v sedmdesátých letech prof. Z. Hasiem a spolupracovníky. Od tamté doby byla tato technologie modifikována beze změny hlavní myšlenky metody [4].

I. Teoretická část

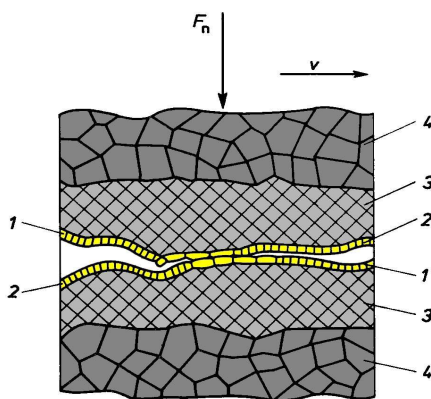
1.1. Druhy a podoba opotřebení

Opotřebení je procesem, ve kterém se vyskytují změny ve vrchní vrstvě pevné latky, charakterizující se ztrátou hmoty nebo deformací povrchu. Tribologické opotřebení, to znamená opotřebení způsobené procesy tření, má charakter mechanicko-fyzicko-chemický.

Takové procesy, ve kterých se vyskytuje oddělení částic z spolupracujících se sebou povrchů skrze přesné obrábění volnými částicemi brusnými nebo objevujícími se mikronerovnostmi, jmenujeme mechanickými procesy. Procesy, ve kterých opotřebení souvisí hlavně s adhezí třecích se těl, jmenujeme procesy fyzického opotřebení. Mezi třecími se materiály nastupují také chemické reakce, které mohou být hlavní příčinou opotřebení (oxidující opotřebení, vodíkové opotřebení) anebo se mohou zúčastnit dalších procesů opotřebení a zrychlit je. [5]

1.1.1. Oxidační opotřebení

Je procesem, který nejčastěji se koná pomalu a zařazujeme ho k procesům normalního opotřebení. Charakter toho procesu je nepřetržitý a probíhá skrze odstraňování vrchních kyslíkových vrstev a také jejich regenerování. Proces má svoji stabilitu tehdy, kdy rychlost a efektivnost oxidace je stejná nebo větší od rychlosti ničení vrstvy oxidů pod vlivem zatížení ve skutečném styku [5]. Na obr. 1. ukazano schéma procesu opotřebení pod vlivem oxidace.



Obr.1. Schéma oxidujícího opotřebení; 1 – původní vrstevky oxidů, 2 – regenerující se vrstevky oxidů, 3 – vrchní vrstva, 4 – domácí materiál (jadro) [5].

Opotřebení skrze oxidaci se nejčastěji vyskytuje během tření kovů a jejich slitin, které mají heterogenní strukturu a liší se mechanickými a chemickými vlastnostmi, a také slitin, které se charakterizují zvýšenou mezí kluzu a zvýšenou tvrdostí.[5].

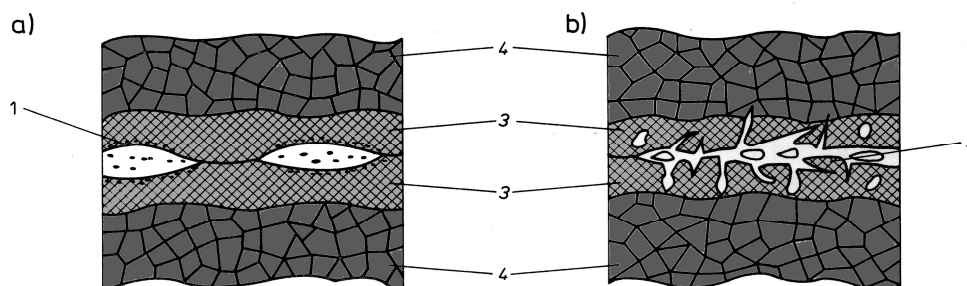
1.1.2. Vodíkové opotřebení

Je to proces chemicko-mechanického opotřebení, který se zakládá na postupném ničení povrchní vrstvy v důsledku adsorpce vodíku na površích oceli a litiny a jeho difuze dovnitř materiálu. Vodík, když difunduje dovnitř materiálu, způsobí křehké praskání ve mikroobjemech vrchní vrstvy a její ničení v důsledku působení normálních a tangenciálních sil [5].

Známe dva tvary vodíkového opotřebení:

- disperzní opotřebení
- opotřebení skrze vydrolení

Oba tvary opotřebení ukazuje schematický obr.2



Obr. 2. Schéma vodíkového opotřebení a) disperzní opotřebení, b) vodíkové ničení
1 – připovrchní disperzovaná vrstevka 2 – připovrchní vrstevka ničená skrze růst štěrbin a o odtrhování zlomků materiálu, 3 – vrchní vrstva, 4 – jádro [5]

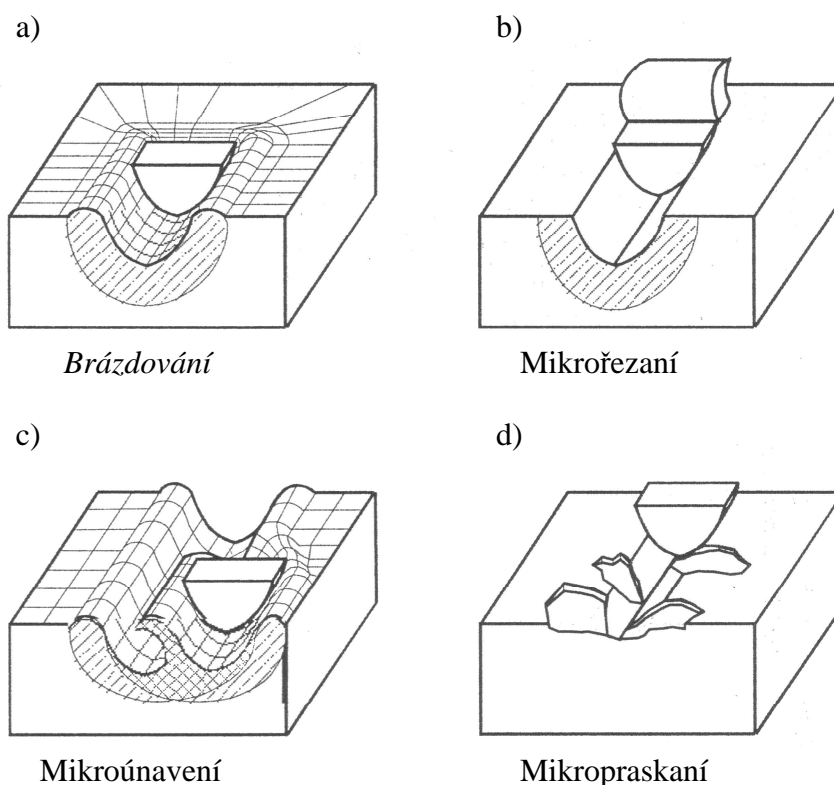
Disperzní vodíkové opotřebení se opírá na oddělení malých částíček materiálu v důsledku působení sil tření, zdurazněných přítomností vodíku.

Vodíkové vydrolení probíhá velmi rychle, charakterizuje se tím, že na povrchu tření se vyskytuje velké množství vydrolení vrchní vrstvy na hloubku 1-2 μm . Tento druh opotřebení se vyskytuje tehdy, kdy připovrchní vrstevka zůstane nasycená vodíkem a současně v důsledku působení normálních a tangenciálních sil probíhá silná deformace vrchní vrstvy [1,5].

1.2.3. Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení se vyskytuje tehdy, kdy probíhá přemístění dostatečně měkkého materiálu skrze tvrdé částky, které působí v oblastí styku. Takové částky mohou být zůstatkem po procesech mechanického obrábění povrchů, být vnějšími znečištění (drobečky písku, skál, atd.), být tvrdými produkty opotřebení, které jsou přenesené do třecího styku, skrze různé druhy exploatačních materiálů, mohou taky vystupovat ve tvaru tvrdých oddělování v multifazových strukturách [1]. Abrazivní opotřebení je nejčastěji výstupujícím druhem opotřebení. Může být hlavním procesem opotřebení nebo může zrychlovat jiné druhy opotřebení. (např. hydroeroze, kavitace atd.) [5].

Rozlišujeme čtyři mechanismy abrazivního opotřebení, které záleží na tvaru ničení povrchních vrstev. obr. 3.



Obr. 3. Možné mechanismy působení tvrdých částek s povrchem materiálu v procesu abrazivního opotřebení [1].



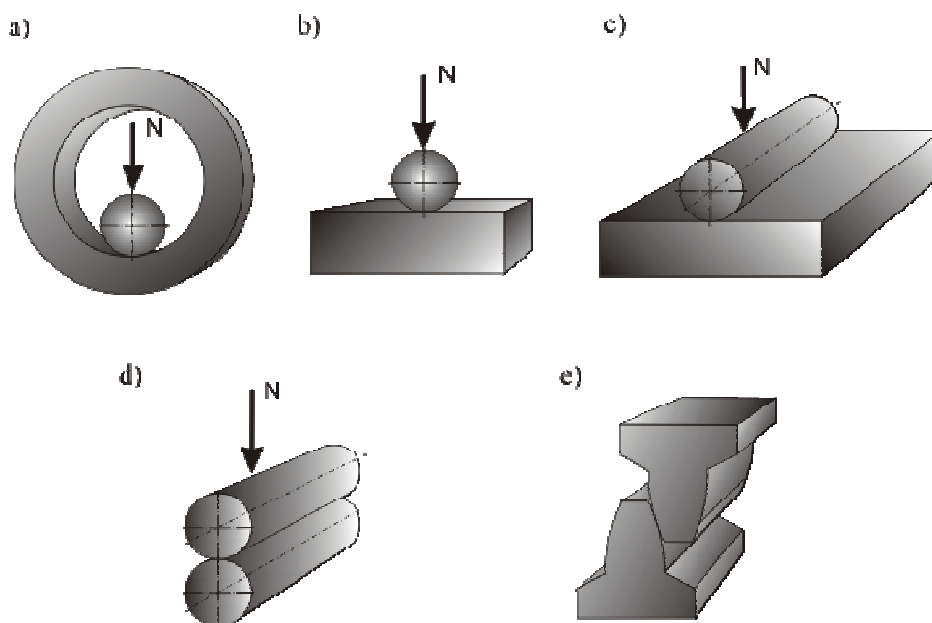
Brázdování je mechanismem souvisejícím s plastickým promístěním materiálů kolem působícího zrna brusiva (kresba 3a). V tomto případě nejsou vytvořené žádné produkty opotřebení. Tvar opotřebení způsobený brázdováním se přičiňuje k změně drsnosti, občas dokonce i k lokálním změnám ve pasovaných spojeních [1].

Mikrounavení povrchu probíhá, kdy proces brázdování se koná spontánně v několika směrech (obr. 3c). Tenhle proces se postupně objevuje: stlačením upevněním povrchu, oddělením produktů opotřebení a zároveň i křehkým praskáním [1].

V důsledků **mikrořezání** probíhá oddělení produktů opotřebení způsobené zrnem tvrdé částky (obr. 3b) [1]. V abrazivním opotřebení materiálů, základními procesy jsou *brázdování* a *mikrořezání*. Teto procesy se liší mezi sebou tvarem obráběcího zrna nebo vyskytu nerovností, a zejména velikosti uhlů samospadu třísky. Jestli je to malý uhel samospadu třísky, tehdy mluvíme o brázdování, jestli je to velký uhel, mluvíme o mikrořezání [5].

1.2.4. Únavové opotřebení

Únavové opotřebení vzniká v důsledku cyklického opotřebení povrchních vrstev spolupracujících součástí, které způsobí jejich únavu [5]. V závislosti na podmínkách pohybu elementů spolupracující tribomechanické soustavy a stavu napjatosti, únavové opotřebení může mít různé podoby. Nejčastěji se vyskytující soustavou, ve které probíhají únavující procesy, je soustava valivého tření. V důsledku točení dvou součástí po sobě, vyskytují se cyklické namáhání v místě styku. V důsledku stále se opakujících styků, v připovrchní vrstvě se objevují mikroprasknutí, které se potom přetvářejí v makroprasknutí, co konečně vede k úbytku materiálu v připovrchní vrstvě [5][6]. Na obrázku 4. jsou ukazané typické příklady třecích párů, kde dochází k opotřebení v důsledku únavení materialu [6].



Obr. 4. Mikrodeformace v tribologických oblastech během únavového opotřebení[6]:

- a) kulička po zakřivené dráze,
- b) kulička po ploše
- c) válec po ploše
- d) válec po válcu,
- e) zuby ozubených kol

Známé jsou dva druhy únavového opotřebení v důsledku točného tření

- opotřebení skrze vydrolení (pitting),
- opotřebení skrze odlupování (spalling) [5].

1.2.4.1. Pitting

Je to druh opotřebení, které probíhá skrze vydrolení, vystupuje v mazacím styku, během točení anebo točení se sklouznutím. Jinou příčinou tohoto druhu opotřebení může být únava povrchní vrstvy, způsobené cyklickým namáháním styku [5]. Pittingové opotřebení se začíná vznikem zárodků křehkého prasknutí v oblasti maximálního namáhání materiálu vnějším zatížením. Čas mezi vznikem prasknutí a jeho výskyt na povrchu je dost dlouhý. Ve chvíli výskytu prasknutí na povrchu

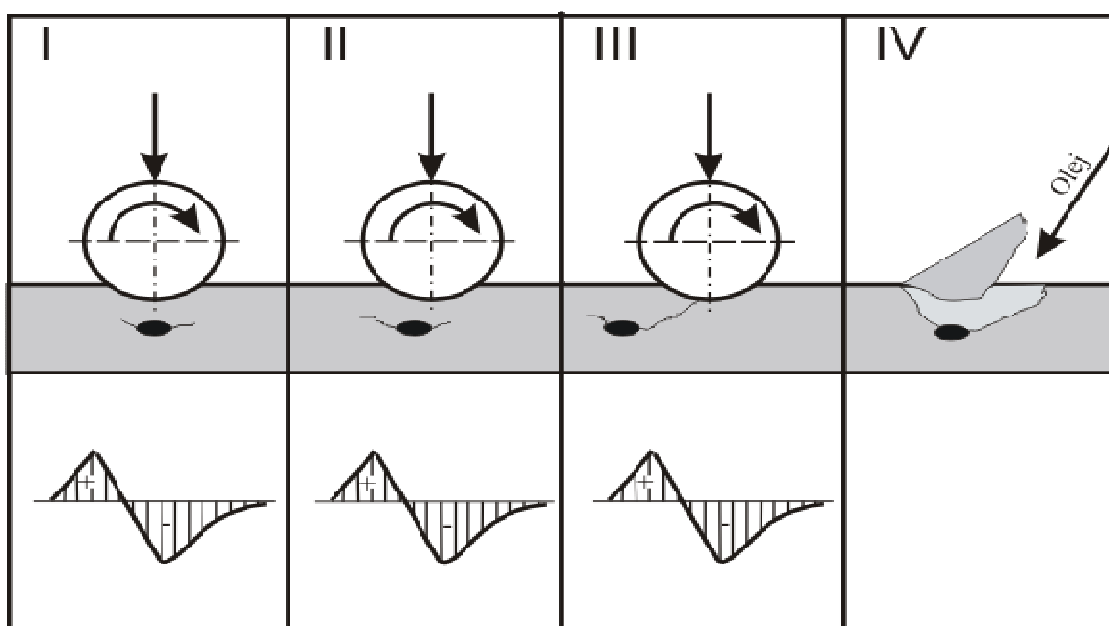
v mezeru je vtlačena mazací látka, která se zučastňuje konečného oddělení částek materiálu od povrchu [1][5].



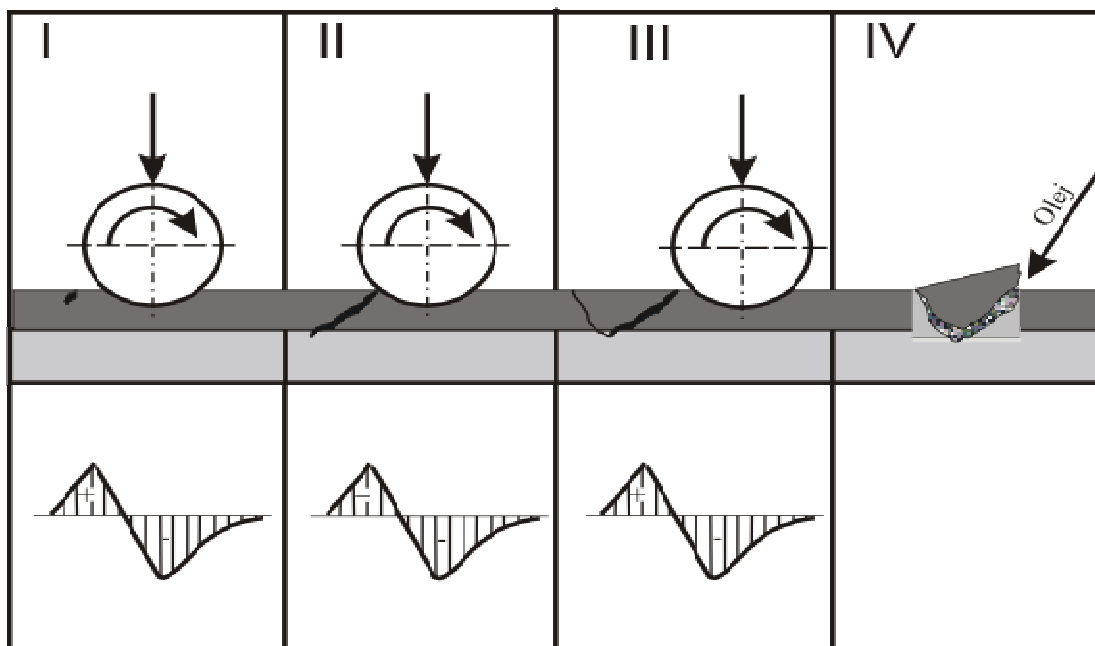
Obr. 5. Fotografie výsledků a podoby opotřebení pittingem [7].

Rozlišujeme dva různé mechanismy stykové únavy.

- normální – který je dlouhodobým procesem, zahajeným v místě, kde se objevují největší zatížení materiálu, v bodě Bielajewa (obr. 6.).
- katastrofický – je krátkodobým procesem, začínajícím se na povrchu nebo v jeho okolí. (rys.7.) [1][2].



Obr. 6. Pitting - schéma vzniku zárodků a propagace prasknutí povrchní vrstvy ve tvaru normální (dlouhodobové) stykové únavy [1,2].

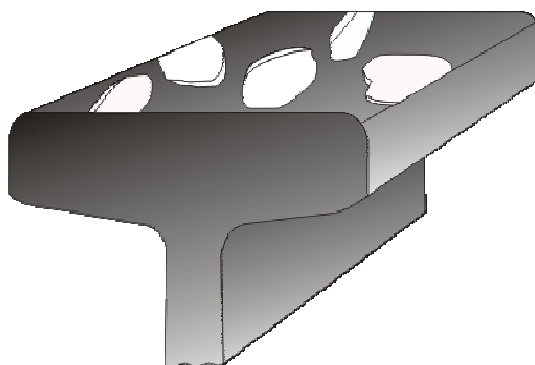


Obr. 7. *Pitting – schéma vzniku zárodků a propagace prasknutí povrchní vrstvy ve tvaru katastrofické stykové únavy [1,2].*

Příčinami katastrofického níčení třecích párů jsou početné nedokonalosti struktury povrchní vrstvy ke kterým patří vyloučení cementytu na hranicích zrn, příliš tlusté a pórovité pásma nitridových sloučenin a taky vyloučení nitridů γ' při hranicích zrn v nitridovaných vrstvách a taky mnoho jiných strukturalních faktorů. Během vzniku zárodků křehkého prasknutí materialu v blízkosti povrchu mohou se na tom taky zúčastnit vlastní pnutí, které vždycky vystupují v upevněných povrchních vrstvách. Na katastrofický průběh pittingu má taky vliv okamžitý účinek mazací latky a zároveň i vyskytování namáhání tahem ve vzrůstu únavového prasknutí [1, 2].

1.2.4.2. Spalling

Opatření skrze spalling se koná v nemazacím styku anebo ve styku s malým množstvím mazacího prostředku během točného pochybu se sklouznutí. Následkem tohoto druhu opotřebení je odtržení částek materiálu ve tvaru šupinek, co způsobuje rozsáhlé, ale mělké ztráty materiálu povrchní vrstvy [5].



Obr. 8. *Hlava kolejnice opotřebená skrze spalling [5].*

Hlavní podmínkou vyskytování opotřebení skrze spalling je vzrůst pnutí uvnitř povrchní vrstvy v následku přímého styku třících se součástí. Růst pnutí v povrchní vrstvě způsobuje vzniknutí mikroprasknutí, které dochází ke povrchu. Způsobuje to zánik spojitosti částek kovu s podložím. Jednou z příčin opotřebení způsobeného spallingem je upevnění materiálu v povrchní vrstvě vyvolané plastickou deformací. Ve srovnání s procesem opotřebení skrze pitting, opotřebení skrze loupaní vzniká ve 2-3 krát kratší době, co dává zřejmě větší ztráty materiálu [6].

1.1.5. Adhezní opotřebení

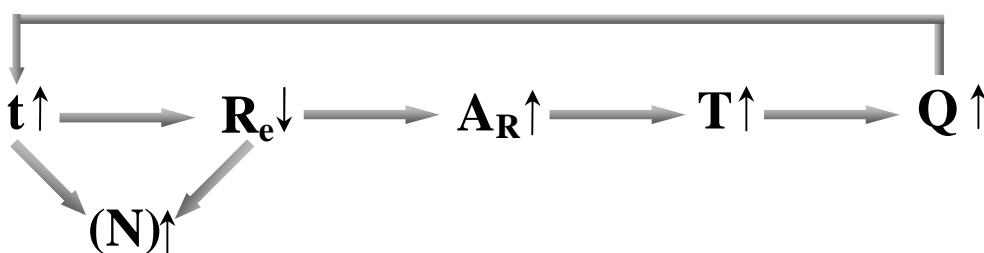
Adhezním opotřebení jmenujeme proces degradace povrchu probíhající v důsledku vznikání mikrospojů a srůstů v mikroprostorech skutečného povrchu styku. Opotřebení tohoto typu se koná nejčastěji při malých rychlostech, ale vysokých tlaků, při slabém mazání anebo vůbec bez mazání. Ve souvislosti s vystupování vysokých tlaků následuje protržení vrstvičky mazacího prostředku, a taky zachranné vrstvičky kyslíků. V následku sbližování odkrytých nerovností povrchu, probíhá jejich spojování anebo třecí srůst a pak porušování těch spojů. Z důvodu malých rychlostí třecích se součástí, tento proces vzniká v nevelkých teplotách, a proto se ho nazývá svařováním v nízkých teplotách. Tento druh opotřebení je nepřijatelný v exploataci strojů, protože způsobuje velké poškození povrchu [5].



Obr. 9. Fotografie výsledků a podoby adhezního opotřebení [7].

1.1.6. Zadírání

Zadírání je procesem opotřebení, který je způsobený rychlým růstem odporu klouzavého tření způsobeného silným zvětšením skutečného povrchu styku, působícím v krátkou dobu trvalé a neodvratné zastavení třecího uzlu. Obrázek 10 ukazuje schéma cyklu jevů vyvolujících proces zadírání v důsledku nekontrolovaného růstu teploty [2].



Obr.10. Schéma cyklu jevů vyvolávajících proces zadírání způsobený nekontrolovaným přirůstem teploty [1].

V důsledku přirůstu teploty t následuje zmenšení mez kluzu R_e způsobené procesami rekristalizace, popouštění a taky velké plastizace slitin kovů ve vysokých teplotách. Růst teploty a taky zmenšení mez kluzu vyvolá zvětšení skutečného povrchu styku A_r , co způsobí růst odporů tření T , w následku kterých navíc vznikne tepelný impuls Q . Přidané teplo způsobí vzrůst teploty třecího styku a díky tomu zachajený proces zadírání sam se urychlí. Pro vyeliminování nebezpečí zadírání součásti strojů, je nutné zajistit účinný způsob vybírání tepla skrze využití vhodných systémů mazání a chlazení. [1].



1.2. Technologie chemicko - tepelného zpracování.

Chemicko - tepelné zpracování, které probíhá cestou difúze kovových nebo nekovových prvků, umožňuje vyrábění difúzních vrstev o jedné nebo několika součástech na podložích poměrně levných materiálů [3]. V této kapitole zkusím krátce charakterizovat některé druhy chemicko - tepelného zpracování, podrobněji se soustředím na technologiích sulfonitridace a karbonitridování.

1.2.1. Cementování

Cementování se zakládá na difúzním nasycení uhlíkem povrchní vrstvy obraběných ocelových detailů. Cementování probíhá v teplotách více než A_{c3} ($880\div 950^{\circ}\text{C}$), v prostředí vylučujících aktivní uhlík. Po nauhličení probíhá proces tepelného zpracování základající se na kalení a popouštění. Zpracované ve procesech cementování detaile získávají tvrdost povrchní vrstvy kolem 62 – 64 HRC, zvýšenou odolnost proti opotřebení a zachovává houževnaté jádro [2].

Proces cementování patří mezi nejstarší druhy chemicko - tepelného zpracování, které podléhly stalým modifikacím s nahrazením konvečních technologií procesem cementování probíhajících v pevných, tekutých a plynových prostředích s použitím vakuových a ionizačních procesů.

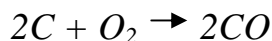
1.2.1.1. Cementování v sytkém prostředí

Cementování v práškách je metodu, kterou se používá zřídka. Příčinou toho je malá účinnost této metody a zároveň velká spotřeba energie, a taky nemožnost použití řízení procesem cementování. Směsi používaná pro nauhličení se skládá z dřevěného uhlí ($80\div 90\%$) jako zdroje uhlí v difúzním procesu a taky uhličitany BaCO_3 , CaCO_3 , Na_2CO_3 jako aktivátorů procesu. Proces se provozuje v teplotách $900\div 930^{\circ}\text{C}$. Součástí k cementování spolu s nauhličující směsí se umísťuje v speciálních žáruvzdorných krabicích a těsně zavírá.



Následně se umísťuje vsázku v komoře pece, která podléhá ohřání do teploty cementování. Během ohřání probíhají vhodné chemické reakce:

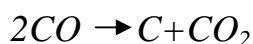
- spalování dřevěného uhlí s nedostatkem kyslíku



- reakce aktivátora s dřevěným uhlím



- nauhličování ocele- reakce Boudourada



- rekombinace aktivátora



Součásti strojů, které zůstaly podrobené procesu cementování práškovou metodou jsou určeny do práce v podmínkách broušného tření s ohledem na vysokou tvrdost povrchní vrstvy. Vadou toho procesu je vnitřní oxidace, která způsobuje zmenšení odolnosti proti únavě [1, 2].

1.2.1.2. Cementování v kapalném prostředí

Z ohledu na svou škodlivost pro přírodu způsobenou těžkou utilizací nauhličujících lázní je opravdu zřídka používanou metodou. [2]. Do cementování se nejčastěji používá ztopené sole, obvykle jsou to směsy uhličitánů, chloridů a kyanidů alkalických kovů. Teplota cementování v koupelích je ve výši $830 \div 850^\circ\text{C}$ [8]. Výhodou cementování v tekutých prostředích je možnost přímého kalení detailů z nauhličující tekutiny. Vadami toho procesu jsou: škodlivost pro přírodu a pro dělníky, vysoké částky utlilize nauhličujícího prostředku a taky nutnost mytí a sušení součástí po provedeném procesu.



1.2.1.3. Cementování v plynném prostředí

Plynné cementování je to proces často používaný v průmyslu, probíhá on v teplotách 820÷930. Atmosféru k procesu cementování můžeme získat díky spalování uhlovodíků v vzduchu. V důsledku toho dostáváme oxid uhelnatý v peci, nebo taky můžeme vytvořit nauhličující atmosféru z tekutých ogranických sloučenin, např. nafty, acetonu, které se odbourávají na oxid uhelnatý, vodor a páru v teplotě procesu. Aby zabránit nevhodnému nanašení saze, která přispívá k obtížení difúze uhlí dovnitř zpracovovaných detailů, nauhličující plyny jsou speciálně očištěné. O výsledcích procesu rozhodují teplota, čas, uhlíkový potenciál, a taky intenzita průtoku nauhličujícího prostředí. [8].

1.2.1.4. Vakuové cementování

Vakuové cementování je jedním z druhů plynového nauhličování, které probíhá spolu se sníženým atmosferickým tlakem. [9] Uhlí k difúzimu nasycení ocele se získává v následku reakce rozpadu metanu, propanu, anebo ostatních uhlovodíků. V tabuli 1. máme srovnání technologie plynového nauhličování s vakuovým nauhličování [1,2,10].



Tab. 1. Srovnání technologií plynového nauhličování s vakuovým nauhličováním

PLYNOVÉ CEMENTOVÁNÍ	VAKUOVÉ CEMENTOVÁNÍ
<p>Menší rychlost difúzního nasycení v důsledku:</p> <ul style="list-style-type: none">- konstrukce přístroje, který omezuje horní teplotu procesu- povrchní koncentrace uhlíku, která je kontrolována uhlíkovým potenciálem atmosféry na úrovni 1,0%C.	<p>Větší rychlost difúzního nasycení v důsledku:</p> <ul style="list-style-type: none">- konstrukce přístroje, který umožňuje vzrůst horní teploty procesu od 100÷150°C,- povrchní koncentrace uhlí, která je vysoká v důsledku nerovnovážního rozpadu uhlovodíků
<p>Nebezpečí vyskytu vnitřní oxidace, která je způsobená sloučeninami oxidu zahrnutým v zpracované atmosféře. Má to vliv na zmenšení vlastností povrchní vrstvy, a hlavně odolností proti únavě.</p>	<p>Jev vnitřní oxidace se nekoná, protože nosičemi uhlíku jsou výlučně uhlovodíky. Díky tomu obdržíme povrchní vrstvy, které charakterizují velmi dobré mechanické vlastnosti</p>
<p>Nůtnost mytí obráběných součástí po kalení v oleji</p>	<p>Součásti po procesu cementování z důvodu chlazení vsázky v plynech vlastní čistý, lesklý povrch, který nepotřebuje mytí.</p>
<p>Velká emise škodlivých látek takových (jako např. oxid uhelnatý a kalný dým) do atmosféry. Nutnost instalování přístrojů ve vydělených kalírnách vybavených ventilací.</p>	<p>Nůlova emise škodlivých látek do atmosféry. Přístroje je možné instalovat synchronicky v pásmech mechanického zpracování.</p>
<p>Během velkosériové produkce se využívá velké množství obráběcí atmosféry v endotermických generátorech.</p>	<p>Opotřebení technických plynů dávávaných do komory pece je mále.</p>
<p>Znatelné deformace během kalení</p>	<p>Mále deformace během kalení</p>



1.2.2. Nitridování

Nitridování je procesem chemicko - tepelného zpracování, které je používané k zpracování součástí strojů a přístrojů pracujících v podmínkách cyklický silně zatížených třecích uzlů. Procesy nitridování podléhají stalému vyvoji ve směru více moderních přístrojů[1,2]

Tab.2. Vlastnosti nitridovaných vrstev [1,2]:

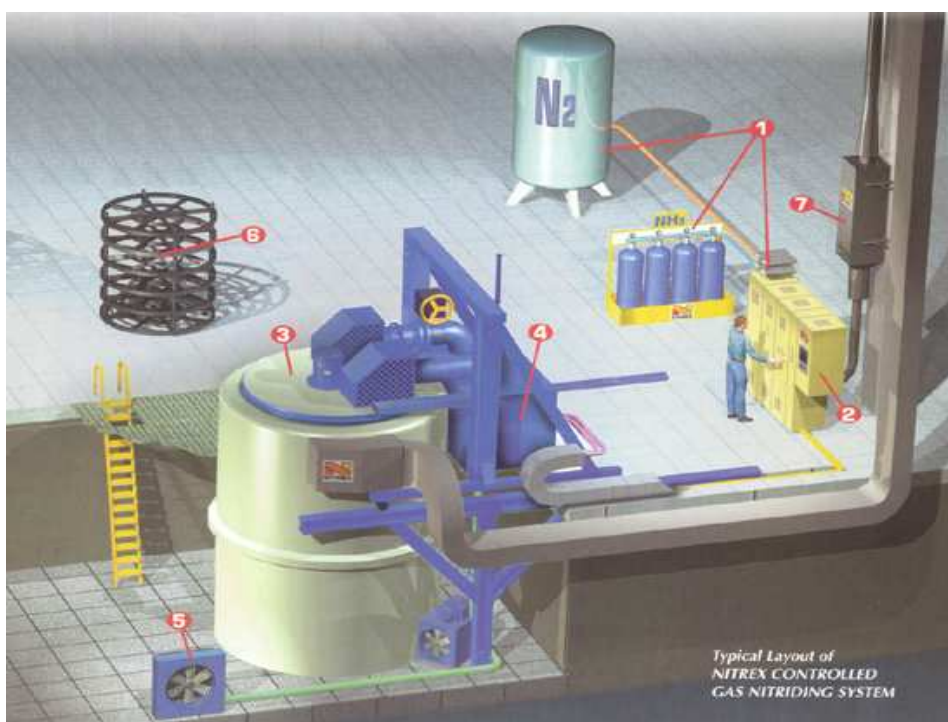
<i>Tvrlost</i>	<ul style="list-style-type: none">▪ Do 1200HV legované ocele k nitridování▪ Do 1500HV nástrojové vysoce legované ocele
<i>Žárůpevnost</i>	Do teploty 600÷650°C bez ztráty vysoké tvrdosti a taky jiných mechanických vlastností
<i>Odolnost na vystírání a adhezní opotřebení</i>	Velmi dobrá
<i>Korozní odolnost</i>	Dobrá
<i>Únavová odolnost</i>	Vysoká
<i>Teplota procesu</i>	500÷600°C- umožňuje formování upevněné povrchní vrstvy na předem tepelně zlepšeným jádře.
<i>Deformace součástí po procesu</i>	Nevelké

1.2.2.1. Nitridování v plynu – NITREG

Nitridování NITREG je procesem plynového nitridování, která poskytuje možnost kontrole dusíkového potenciálu, co v důsledku má účast v získání vrstev o kontrolovaném složení [11]. Nitridující atmosféra použita v této metodě je složená z $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{-N}_2$. Charakteristickou vlastností této atmosféry je snížení nitridující účinnosti v odlišení od procesu konvenční nitridace[2]. Díky tomu procesu máme možnost řízení parametrů tvrdosti, tloušťky difúzního oblastí a oblastí vyloučení [11].

Výhody procesu NITREG

- plná kontrola parametrů procesu.
- spolehlivost a opakovatelnost výsledků
- minimalizace deformace
- eliminace broušení křehké vrstvy,
- lepší účinné vlastnosti, díky kontrolované koncentraci dusíku ve vrstvě



Obr. 11. *Typické rozmístění přístrojů k nitridování metodou NITREG [12].*

1. *Výrobník nitridující atmosféry*
2. *Řídící skříň pece*
3. *Pec pro nitridování*
4. *Chladicí systém*
5. *Závěr oběhu studené vody*
6. *Věšáky na vsazku do pece*
7. *Systém neutralizace plynů*



Níže uvedené fotografie ukazují dva typy pecí výroby NITREX METAL INC. Kanada, pro nitridování technologií NITREG [12].



Obr. 12. Svislý pec pro plynové nitridování NITREG[12]



Obr. 13. Vodorovný pec pro plynové nitridování NITREG[12]

1.2.2.2. Vakuové nitridování

Vakuové nitridování nese se sebou neomezené možnosti formování struktury a taky chemického složení nitridovaných vrstev. Výhodou této technologie je pozískání celkové opakovatelnosti výsledků [2]. Díky technologii NITROVAC vrstvy jsou vytvořené metodou charakterizující se velmi dobrou tvrdostí a zároveň dobrou plastičností. Je to způsobené oslabeným účinkem vodíku se zpracováváním materiálem během probíhajícího procesu při sníženém částečkovém tlaku vodíku, který pochází z rozpadu katalytického amoniaku [2, 13].

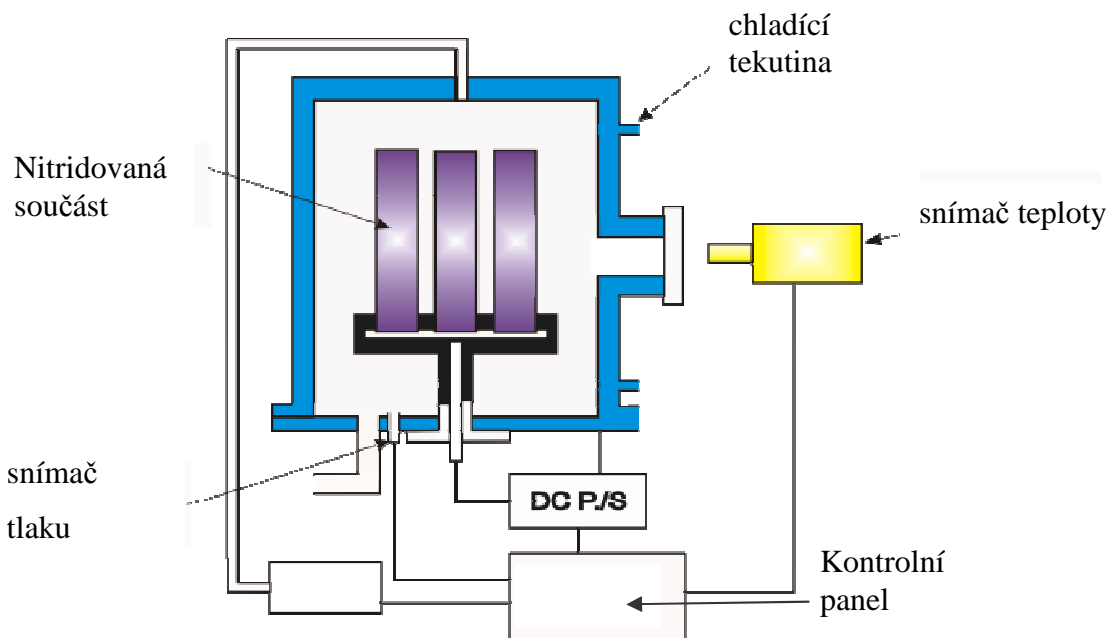
Technologie NITROVAC má dvě etapy.

1. Krátkodobé, chemické a chemicko - tepelne aktivování povrchu, kterého cílem je rozložení pasivní oxidové vrstevky
2. Nitridování se sníženým tlakem, v kterého důsledku narůstají vrstvy o regulované koncentrací dusíku [1,2].

Vakuové nitridování je velmi doporučeno k obrábění ozubených kol udělaných na hotovo zaškrabáváním, protože po procesu není nutné brušení kol. Technologie vakuového nitridování je vhodná taky pro zpracování obráběcích nástrojů, matic, kolků a kokil. [1].

1.2.2.3. Plazmové nitridování

Plazmové nitridování, zvané taky ionizačním, je druhem chemicko - tepelného zpracování, které má za účel upevnění povrchu detailu podrobeného temu zpracování. Metoda se zakládá na použití elektrického výboje pro zavedení atomů dusíku do povrchu kovu. Na obr.14. máme ukazané schéma pece pro plazmové nitridování [14].



Obr.14. Schéma pece pro plazmové nitridování [14].



Proces plazmového nitridování se koná v vakuových pecích, ve kterých energie vysokého napětí je používána pro formování plazmy. Komora pece zůstává naplněná směsí plynů (dusík + vodík). Během procesu nitridovaná součást plní roli katody, a stěna pece plní funkci anody. Mezi těma součástmi vzniká napětí působené doutnavým výbojem, důsledku kterého plyn je ionizován a iony dusíku jsou zrychlené směrem nasazené součásti. Tím způsobem vzniká nitridovaná vrstva, která se charakterizuje vysokou tvrdostí. Díky technologii plazmového nitridování, máme možnost kontrolovat tloušťku nitridované vrstvy. Ne velikost upevněné vrstvy mají vliv této parametry: proud výboje, teplota a délka trvání procesu. Díky možnosti regulací těchto parametrů máme taky možnost regulace tloušťky získaných vrstev[14].

1.2.3. Karbonitridování

Karbonitridování je procesem difúzního nasycení uhlíkem a dusíkem v tekutých a plynových prostředích.

Rozlišujeme dvě metody karbonitridování:

1. karbonitridování ve vysokých teplotách provozované v teplotách $750 \div 950^{\circ}\text{C}$, je ono běžně používané například k zpracování konstrukčních součástí v automobilovém průmyslu.
2. karbonitridování v nízkých teplotách, provozované v teplotách $560 \div 580^{\circ}\text{C}$ [3].

Proces plynového karbonitridování je možno provést v hlubinných pecích uvedených na obr. 15 výroby Elterma S.A [15].



Obr. 15. Hlubinné pece vyrobené v Elterma S.A[15]



1.2.3.1. Karbonitridování ve vysokých teplotách

Během procesu karbonitridování ve vysokých teplotách dusík má následující funkce:

- změňují uhlíkový potenciál atmosfér,
- zvětšují rychlost difúze uhlíku v austenitu,
- podnází aktivnost uhlíku v austenitu,
- změňují podmínky rovnováhy ve soustavě železo – cementit,
- způsobují růst trvalosti přechlazeného austenitu,
- snižují teplotu martenzitické přeměny,
- zvětšují množství zbytkového austenitu.

Parametry, které ovlivňují konečný výsledek karbonitridování:

- teplota
- čas
- uhlíkový a dusíkatý potenciál atmosféry
- intenzita průtoku atmosféry

Proces vysokoteplotního karbonitridování se provozuje v teplotách $750\div 950^{\circ}\text{C}$; nejčastěji $840\div 860^{\circ}\text{C}$. Pokud proces se koná v teplotě $750\div 780^{\circ}\text{C}$, získáme tenší vrstvy, obsahující velké množství zbytkového austenitu, a v přípovrchové vrstvě se tvoří karbidy nebo karbonitridy. Karbonitridování v tom rozsahu teploty se doporučuje v případech, kdy:

- je požadované, aby zpracovaný předmět měl měkké jádro a není nutné získání vysokých tvrdostí,
- chceme získat tenké vrstvy kolem $0,1\div 0,3\text{ mm}$, a použití vyšších teplot vyvolá jejich příliš rychlý a nerovný růst v různých místech vsázky.

Doba potřebná k získání karbonitridovaných vrstev ovhodných tloušťkách záleží na:

- teplotě procesu
- uhlíkovým a dusíkatým potenciálu atmosféry
- typu zpracované ocele. [3].

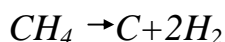
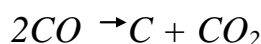


1.2.3.2. Karbonitridování v nízkých teplotách

Během karbonitridování v nízkých teplotách, v povrchní vrstvě se tvoří pásmo o tloušťce $10 \div 30 \mu\text{m}$, obsahující karbonitridy $[\text{Fe}_{2-3}(\text{C}, \text{N})]$ nebo oxikarbonitridy $[\text{Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C}, \text{O})]$, na základě nitridů ϵ s obniżeným obsahem dusíku ($5 \div 6\%$) [3].

V nízkoteplotních procesech karbonitridování je možné používání atmosféry složené z: 50% NH_3 i 50% CH_4 nebo endormického plynu; $30 \div 40\% \text{NH}_3 + 60 \div 70\% \text{CH}_4$; směsu $\text{NH}_3 + \text{CH}_4 + \text{CO}$ s přidavkem kyslíku nebo vzduchu a taky směsu NH_3 a neočištěného endoplynu (v různých proporcích). Nízkoteplotní karbonitridování se provozuje v teplotách $560 \div 580^\circ\text{C}$ v době od 2 ÷ 5h.

Během tohoto procesu probíhají této reakce [8]:



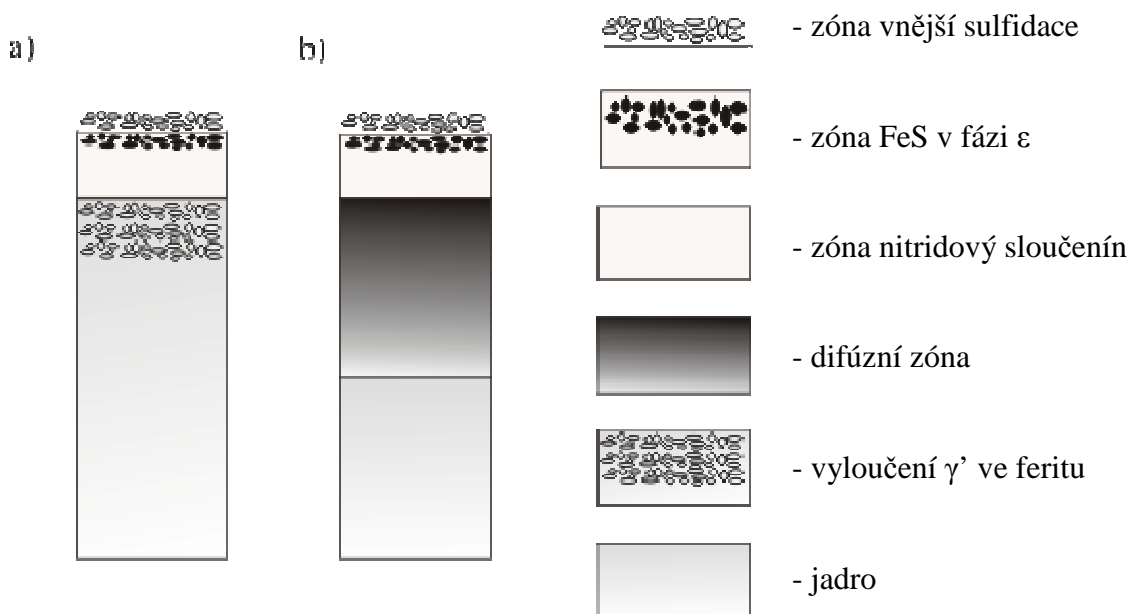
Pak disociace amoniaku, která umožňuje další absorpci a difúzi atomů uhlíku a dusíku do hloubky ocele [8].

1.2.4. Sulfonitridace

Sulfonitridování v plynném prostředí je originální metodou chemicko-tepelného zpracování, která probíhá v retortových pecích v atmosféře amoniaku a pár síry v teplotách $500\text{--}700^\circ\text{C}$. Doba procesu trvá od 30 minut až několik hodin. V důsledku toho procesu obdržujeme nitridovanou vrstvu takovou, jak v metodě klasického nitridování, s tím, že ve fázi ϵ vystupují vyloučení FeS , které oddělují třecí povrchy a snižují adhezi [16]. Charakteristickou vlastností sulfonitridovaných vrstev v pásmě výskytu sírníků železnatého je kladný gradient tvrdosti kolmým směrem k povrchu, což vlivá na usnadňování zabrušování části v počáteční době eksploatace, a tím způsobuje rychlé získání velkého povrchu doléhání a to způsobuje zmenšení tlaků v pásmě styku spolupracujících součástí. Důsledkem toho obdržujeme vrstvy s vysokou odolností na opotřebení, nízkým koeficientem tření a vysokou odolností na zadírání [1, 15]. Metoda plynového sulfonitridování je vhodná pro obrábění součástí z nízkolegovaných, střednělegovaných a vysokolegovaných ocele a taky z nástrojových ocelí a litin [15].



V závislosti od použitého podloží můžeme získat různou strukturální konstrukci sulfonitridačních vrstev (obr.16).



Obr. 16. Technologická struktura povrchní vrstvy na plynovo sulfonitridovaných součástech [1, 4, 17] :

a) uhlíkové ocele a šeda litina nelegovaná

b) legované ocele a legovaná litina obsahující prvky tvořící nitridy.

Pro uhlíkové ocele a šedivé nelegované litiny, zvýšená tvrdost sulfonitridovaných vrstev je omezená do zóny nitridových sloučenin ϵ , $\epsilon+\gamma'$, γ' , (obr. 16a) a nepřekračuje 700HV. Zatím, sulfonitridované vrstvy na uhlíkových ocelích a šedých litinách můžeme použít tam, kde povrchní tlaky nejsou příliš velké. Sulfonitridované vrstvy na ocelích legovaných (obr. 16b) charakterizuje velká tvrdost v zóně nitridových sloučenin, dokonce i do 1300HV, a taky v difúzní zóně od 1200 do 500 HV.

Toho typu vrstvy na legovaných ocelích můžeme používat ve třecích soustavách, kde se vyskytují velké povrchní tlaky [1, 4, 17].



Proces plynového sulfonitridování s použitím technologie SULFONIT může být řízený při pomoci pece VVT 100/200 NSv. (obr. 17) výroba:SECO/WARWICK S.A.



Obr. 17. *Hlubinný pec k sulfonitridaci [4].*

Tab.3. *Rozměr retorty pecí pro sulfonitridace[4]*

Průměr	1000 mm
Výška	2000 mm
Max hmotnost vsázky	1300 kg.



1.2.4.1. Ekonomické, technické a ekologické aspekty technologií plynové sulfonitridace

Proces plynové sulfonitridace má technické, ekonomické a ekologické přednosti, mezi nejdůležitější patří:

Tab.4. *Technicko-ekonomická a ekologická analýze procesu plynové sulfonitridace [4,18,19].*

1.	Plynová sulfonitridace způsobuje zvýšení odolnosti proti korozi a růst odolnosti proti únavě, co vede k snížení nákladů na exploataci strojů a přístrojů.
2.	Novinkou v peci pro sulfonitridaci je mezi jinými speciální hořák, ve kterém jsou dopalné poprocesní plyny, aby zabránily znečištění přírody, přímo do atmosféry se dostává jenom dusík a vodní pára.
3.	Možnost regulace procesu sulfonitridace zaručující opakovatelnost obdržování vrstev o předpokladané tloušťce.
4.	Součásti určené k sulfonitridaci se vyrábí nahotovo před procesem, což eliminuje drahou operaci dokončujícího broušení
5.	Možnost depasivace povrchu přísadami pár síry do atmosféry částečně disociovaného amoniaku přispívá k získání opakovatelnosti výsledků, uniknutí nerovnoměrné tloušťky vrstvy, a také umožňuje rozšíření rozsahu použití sulfonitridace na obrábění vysokolegovaných ocelí a také austenitických kyselinovzdorných ocelí.
6.	Malá spotřeba technických plynů a energie použitých na jejich ohřev a disociaci.
7.	Vysoká účinnost a efektivita zaručuje nižší spotřebu energetických faktorů a tímto zmenšuje znečištění přírody na etapě jejich produkce u výrobců
8.	Vysoký stupeň bezpečnosti a ergonomie práce. Peci pro sulfonitridaci je bezpečným přístrojem, a jeho obsluha pracuje bez vystavení nebezpečí. Správná exploatace pece, vedená podle instrukce zaručuje bezpečí obsluhy, přístroje a jeho okolí.
9.	Není nutný dohled nad nepřerušovanou prací přístrojů, a obsluha je omezená do spuštění programu práce a činnosti naložení a vyložení vsázky. Po spuštění procesu, veškeré činnosti probíhají automaticky bez ingrence obsluhy až do ukončení procesu.

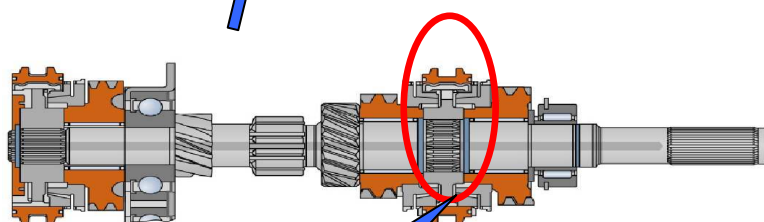


1.3. Převodová skříň MQ 200

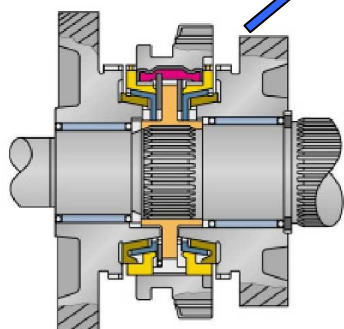
Převodová skříň MQ 200 je určená pro tři výrobce koncernu Volkswagen. Hodnocené jsou na nejvyšší úrovni kvality. Kolem 30% převodů vyrobených Škodou Auto jsou určené na export do závodu Volkswagen Bratislava, kde jsou montované do vozidel Volkswagen Polo a taky do Neckarlsnlm – do Audi A2.



Obr.18.*Převodová skříň
MQ200:5MT*



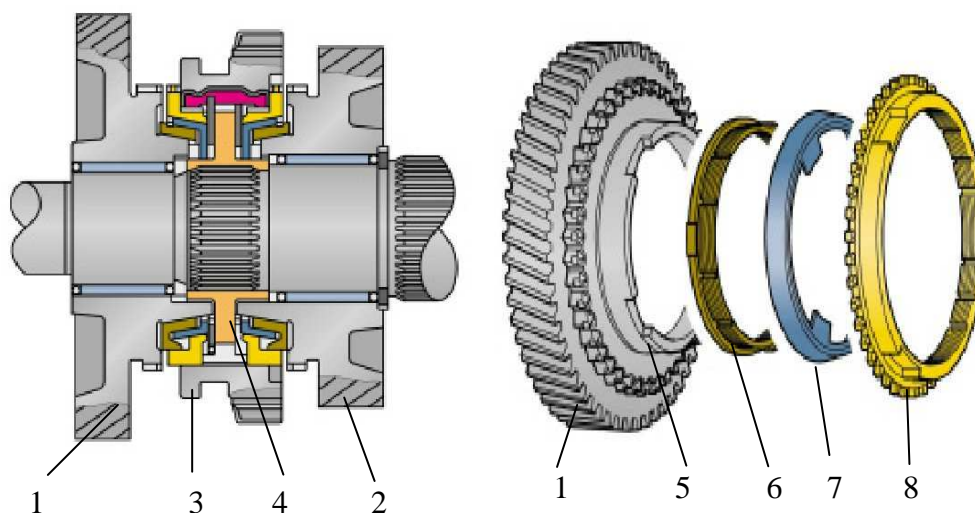
Obr.19.*Vstupní hřídel
převodovky MQ 200*



Obr.20.*Synchronizační
spojka*

1.3.1. Konstrukce a pravidla fungování synchronní spojky.

Synchronní spojka je přístrojem sloužícím k vyrovnávání rychlosti obvodových párů spojovaných ozubených kol, přímo před jejich ozubením.



Obr. 21. Konstrukce synchronizátora použitého v převodové skříní MQ 200 (Škoda Fabia) [20].

1 a 2 – ozubené kolo, 3 – přesuvná objímka 4 – jádro synchronní spojky (centrální součást) 5 – třecí kužle 6 – vnitřní synchronní kroužek, 7 – kužlový kroužek, 8 – vnější synchronizační kroužek.

Pravidlo fungování synchronizátora spoléha na předběžným ozubení zabíraných ozubených kol při pomoci třecích součástí, které se klouzají po sobě a přivádí k vyrovnání rychlosti obvodových kol. Potom zuby jednoho kola se nasazují na zuby druhého kola. Synchronizace záběrů v převodových skříních ulehčuje přepínání záběru a zároveň zabraňuje vystupování skřípání a taky poškození ozubených kol při nesprávném spouštění záběru [23].



II. Experimentální část

2.1. Zkušební metodika.

2.1.1. Zkušební materiál.

V navržené magisterské práci bylo provedeno chemickotepelné zpracování jádra synchronní spojky převodové skříně MQ200 spočívající v sulfonitridaci a karbonitridaci. Obrázek 22 znázorňuje jádro synchronní spojky převodové skříně MQ 200.



Obr.22. *Jádro synchronní spojky*

Na zkoušky byl použit ocelový materiál podle české normy ČSN 412050; dle polské PN H-84019-93 . Tato ocel je určena pro tepelné zušlechťování a povrchové vytvrzování. Zhotovují se z ní mj. ozubená kola, klikové hřídele, ozubené věnce atd. Z tohoto materiálu se rovněž vyrábějí jádra synchronní spojky převodových skříní MQ 200. Tabulka 1. představuje procentní chemické složení oceli.

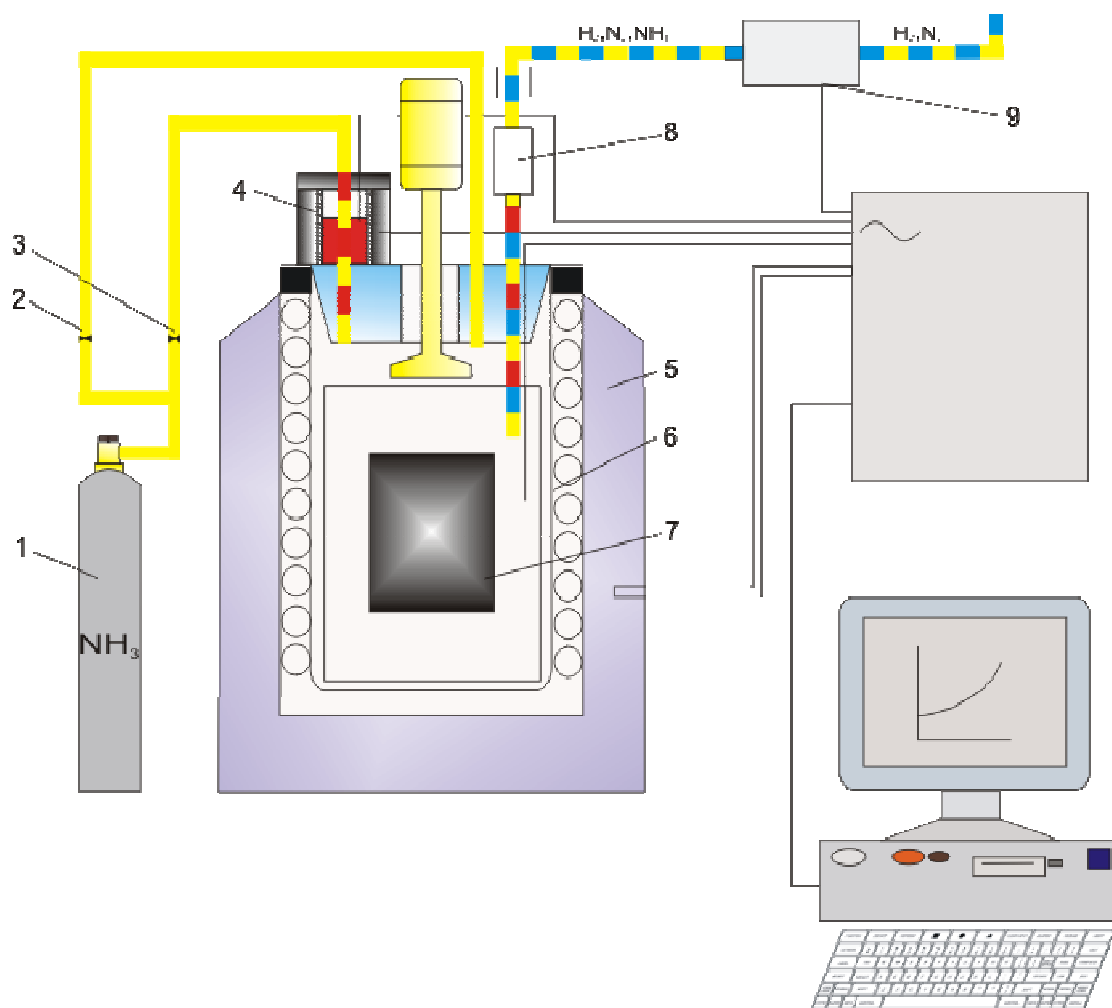
Tab.5. *Chemické složení [%] konstrukční oceli určené na jádro synchronní spojky převodové skříně MQ 200 .*

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,50 ÷ 0,55	0,15 ÷ 0,35	0,65 ÷ 0,90	≤0,035	0,060 ÷ 0,080	≤0,2

2.1.2 Popis pracoviště chemicko-tepelného zpracování

▪ Pracoviště sulfonitridace v plynu.

Proces sulfonitridace v plynu byl proveden v Belchatowsko – kleszczowském průmyslově-technologickém parku v peci VVT – 100/200 NSv. výroby SECO/WARWICK S.A. Hlavní části pece pro sulfonitridaci jsou znázorněny na obr. 2.



Obr.23. Schéma pracoviště sulfonitridace[4].

1-zásobník s amoniakem, 2-regulátor přímého průtoku amoniaku do retorty, 3-regulátor průtoku amoniaku dávkovačem síry, 4-dávkovač síry, 5-výhřevné těleso, 6-retorta, 7-vsázka, 8- absorber výparů síry z „výchozí“ atmosféry, 9-kontrolní systém složení atmosféry.



▪ **Pracoviště karbonitridace v plynu.**

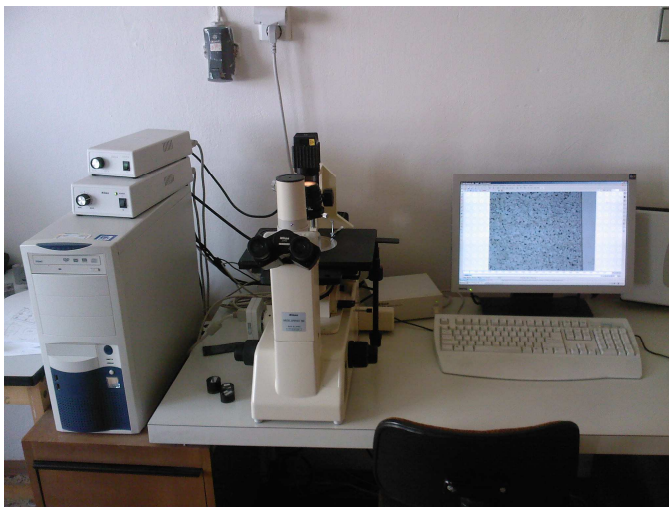
Proces karbonitridace v plynu byl proveden v karuselových pecích firmy IPSEN závodu Škoda Auto - Mladá Boleslav. Karbonitridace byla prováděná v endoplynu a amoniaku.



Obr.24. *Karuselová pec pro karbonitridaci v plynu [24].*

2.1.3. Pracoviště metalografických zkoušek.

Pracoviště optické mikroskopie je vybaveno mikroskopem EPIPHOT 200 (NIKON) se zabudovanou kamerou DS. – 5M – U1 (NIKON). Máme možnost přenosu pozorovaných obrazů prostřednictvím kamery do počítače, kde pomocí vhodného software můžeme provádět analýzu získaných obrazů. Metalografické zkoušky byly provedeny na Technické univerzitě v Liberci.



Obr.25. *Pracoviště optické mikroskopie.*



2.1.4. Pracoviště měření mikrotvrdosti

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno mikrotvrdoměrem Sopolem nacházejícím se na Lodžské polytechnice v Lodži. Měření bylo provedeno Vickersovou metodou, která spočívá ve vtlačování do zkoušeného materiálu zkušební tělíska ve formě diamantového hranolku se čtvercovou základnou. Tvrdost je úměrná poměru zatížení k bočnímu povrchu trvalého vtisku.



Obr.26. Pracoviště měření mikrotvrdosti.

2.1.5. Pracoviště tribologických zkoušek

Tribologické zkoušky byly provedeny testerem T-11 metodou PIN – ON – DISK na Lodžské polytechnice v Lodži. Výše uvedený tester je určen k vyhodnocení tribologických vlastností materiálů používaných pro třecí páry součástí strojů a zařízení. S jeho pomocí můžeme sledovat změny koeficientu tření, přemísťování vnikacího tělíska do hloubky zkoušeného materiálu, změny teploty v blízkosti vnikacího tělíska v závislosti na rychlosti skluzu, tlakové síly působící na povrch a také jiné faktory.

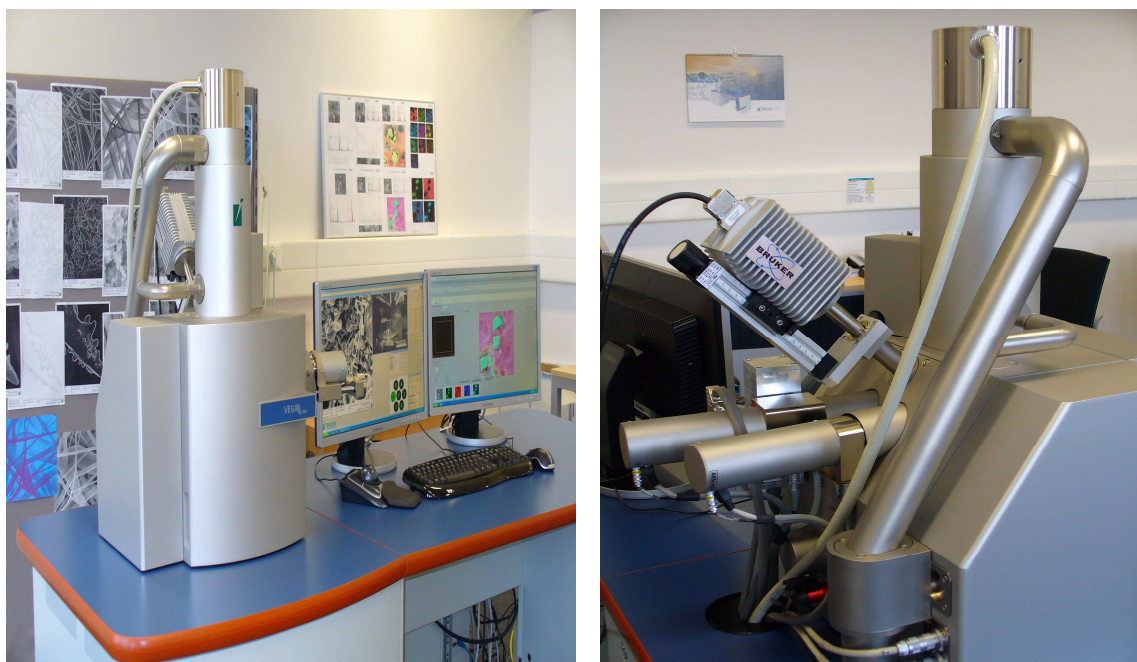


Obr.27. Tester T-11 pro tribologické zkoušky pomocí metody PIN-ON-DISK [25].



2.1.6. Pracoviště rentgenové mikroanalýzy.

Rentgenová mikroanalýza povrchů opracovaných součástí byla provedená pomocí rastrovací elektronové mikroskopie firmy TESCAN a adaptéru na rentgenovou mikroanalýzu EDS firmy QUANTAX v laboratoři závodu Škoda Auto - Mladá Boleslav.



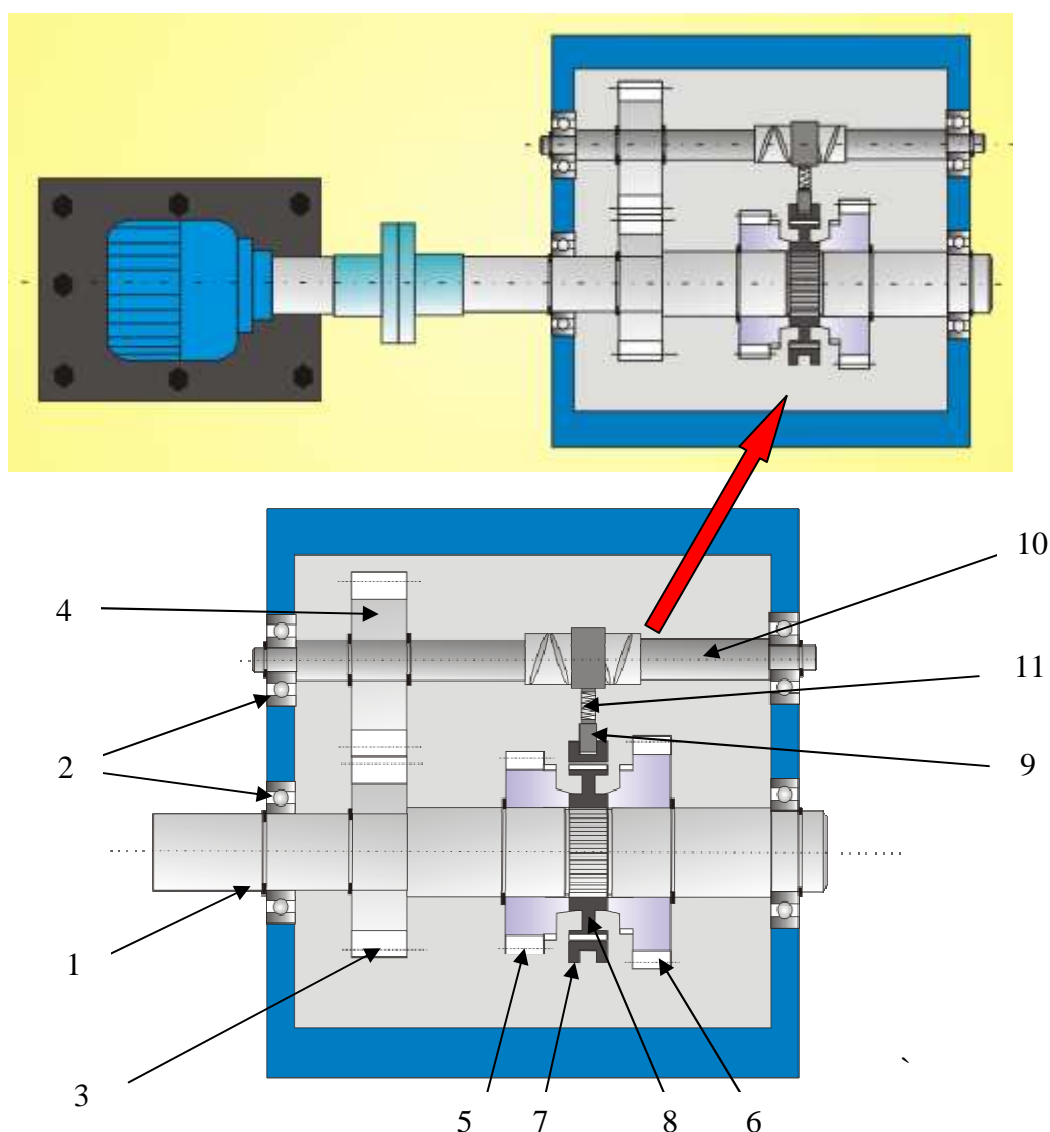
Obr.28. *Pracoviště skenovací mikroskopie firmy Tescan, a adaptéru EDS firmy QUANTAX*



2.1.7. Návrh pracoviště měření opotřebení jádra synchronní spojky.

Průběh testu:

- 1) Zamontování jádra synchronní spojky na pracovišti
- 2) Zprovoznění pracoviště – pracovní doba 1000 h
- 3) Odmontování jádra synchronní spojky
- 4) Provedení příslušných měření za účelem změření veličiny úbytku pomocí vhodných měřicích nástrojů.



Obr. 29. Schéma pracoviště měření opotřebení jádra synchronní spojky.

1 – hnací váleček, 2 – ložiska, 3 – hnací ozubené kolo, 4 – hnané ozubené kolo, 5 a 6 – ozubená kola prvního a druhého stupně, 7 – posuvné pouzdro, 8 – jádro synchronní spojky, 9 – přesouvací vidlice pouzdra, 10 – posuvný váleček (wormshaft), 11 – pružina



2.2. Výsledky zkoušek.

2.2.1. Parametry zadané během procesu usazování vrstev.

▪ Proces sulfonitridace:

Proces sulfonitridace se skládá z následujících etap. Po umístění vzorků v peci se vypumpuje vzduch na tlak (asi 80mbar), a poté se vpouští dusík. Následuje vstupní ohřev v dusíku na teplotu 350°C. Pak uzavíráme přívod dusíku a napouštíme amoniak, ohříváme na teplotu procesu ($520 \div 620^\circ\text{C}$), během kterého do pece přidáváme pouze amoniak. Po dosažení teploty procesu jsou do pece dodatečně přidávány výpary síry. Doba procesu sulfonitridace je od 6 ÷ 30 hodin v závislosti na kvalitě oceli, kterou chceme zpracovat a tloušťce vrstvy, jakou chceme dosáhnout. Po procesu následuje chlazení na teplotu 400°C v přítomnosti amoniaku a síry, po čemž následuje zastavení přívodu amoniaku a výparů síry a do retorty pece je vpouštěn dusík. Následuje chlazení vsázky v dusíku na teplotu 50°C. Na konci vypumpujeme plyny z retorty na (1 mbar) pomocí vakuové pumpy a napouštíme vzduch.

Tab.6. Parametry zadané během sedimentace sulfonitridovaných vrstev

Teplota procesu	540° C
Čas procesu	6 h

▪ Proces karbonitridace:

Proces karbonitridace se skládá z následujících etap. Součásti jsou nejdříve umyty a osušeny. Dále části určené k karbonitridaci se umísťuje v peci. Po uzavření pece následuje vypumpování vzduchu a potom její ohřev na teplotu procesu 580°C. Po dosažení příslušné teploty je do komory napouštěn endoplyn a amoniak. Po procesu je vsázka automaticky převezena do sousední komory s kalicím olejem, kde následuje chlazení vsázky. Teplota oleje je 90°C. Po ukončení chlazení je vsázka umyta a osušena.



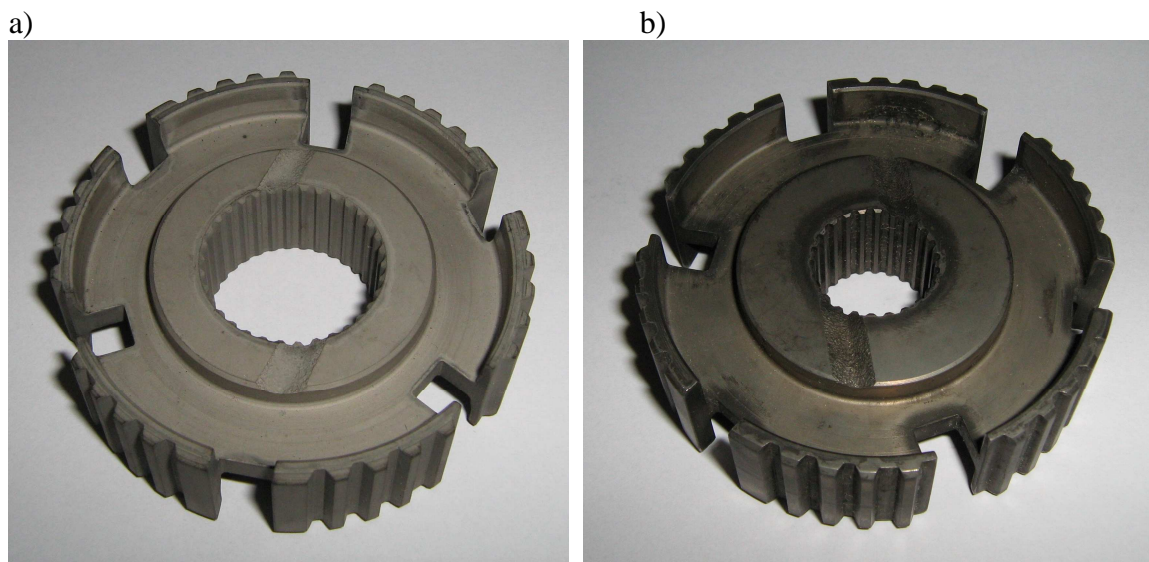
Tab.7. Parametry zadané během sedimentace karbonitridovaných vrstev.

Teplota procesu	580° C
Průtok endoplynu	5Nm ³ /h
Průtok amoniaku	5Nm ³ /h
Čas procesu	105min

2.2.2. Charakteristika získaných vrstev.

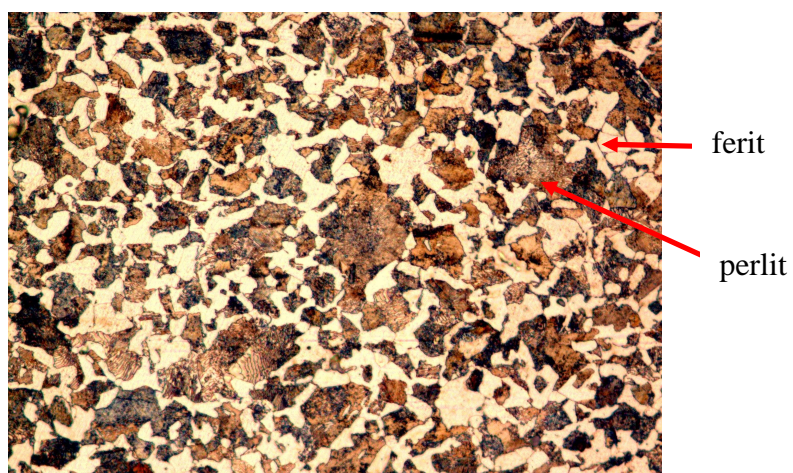
2.2.2.1. Makroskopické a metalografické zkoušky

Na níže uvedených fotografiích vidíme jádra synchronní spojky po provedených procesech chemickotepelného zpracování a také fotografie metalografických struktur. Vzorky k metalografickým zkouškám byly dříve připraveny broušením o hrubosti od 180 do 1200 a poté byly leštěny. Následně byly vzorky leptány Nitalem za účelem prokázání struktury.

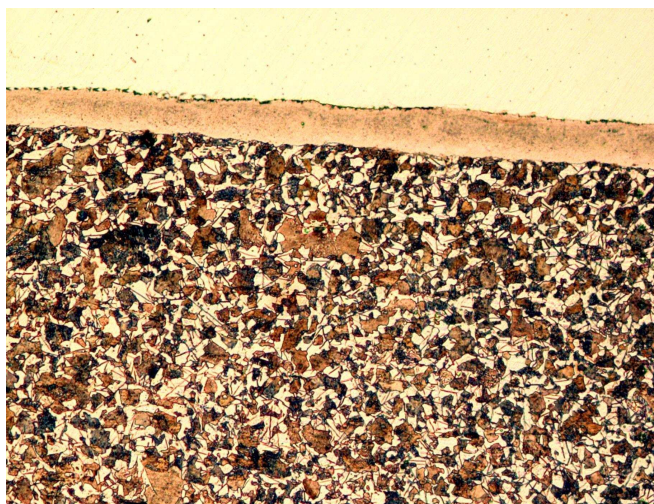


Obr. 30 Části vystavené procesu sulfonitridace a karbonitridace.

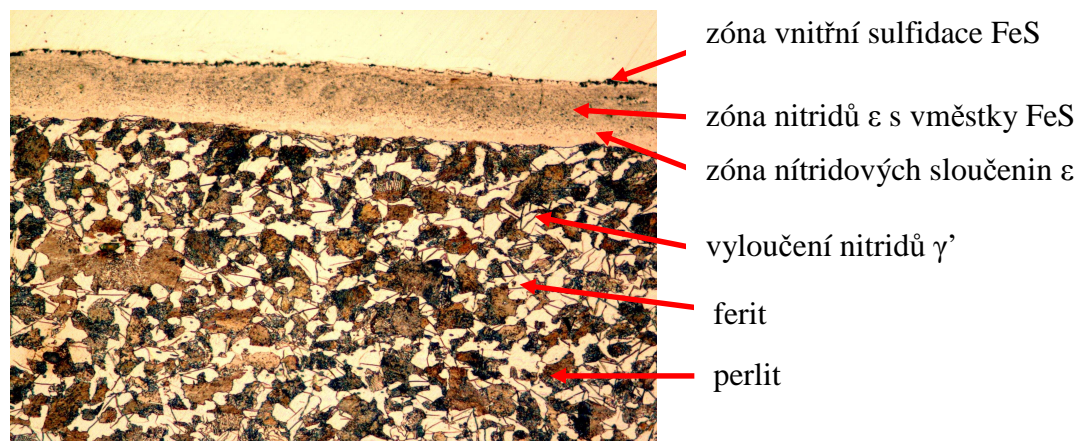
a) sulfonitridovaný jádro b) karbonitridovaný jádro



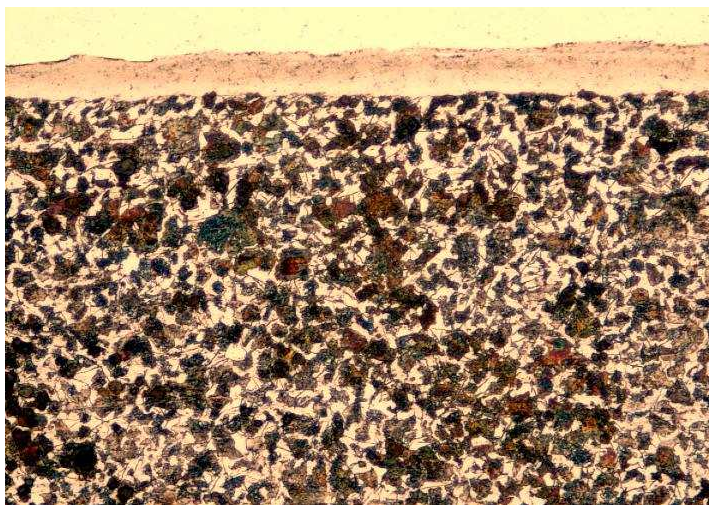
Obr. 31. *Struktura jádra* Zvětš. 500×. *Leptáno $Mi1Fe$.*



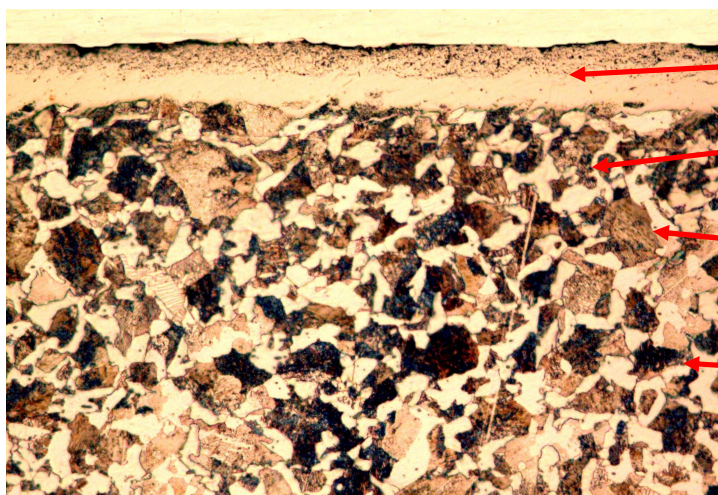
Obr. 32. *Struktura sulfonitridované vrstvy.* Zvětš. 200×. *Leptáno $Mi1Fe$.*



Obr. 33. *Struktura sulfonitridované vrstvy.* Zvětš. 500×. *Leptáno $Mi1Fe$.*



Obr. 34. *Struktura karbonitridované vrstvy. Zvětš. 200×. Leptáno $Mi1Fe$.*



zóna nitrídových sloučenin ϵ

zóna vyloučení nitridů ve
feritu

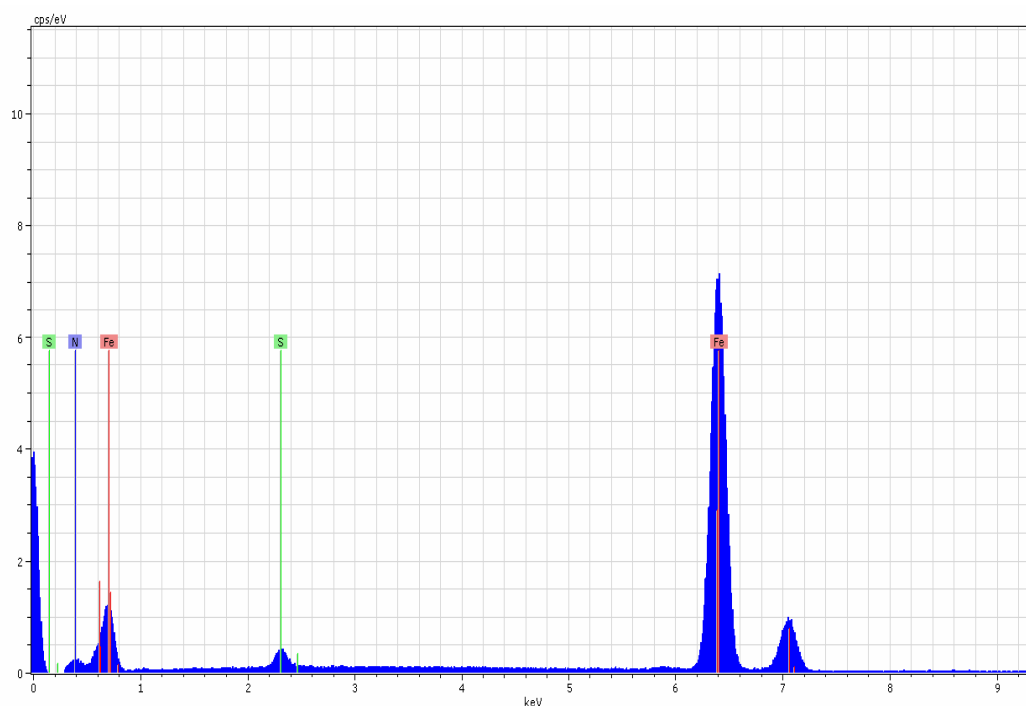
ferit

perlit

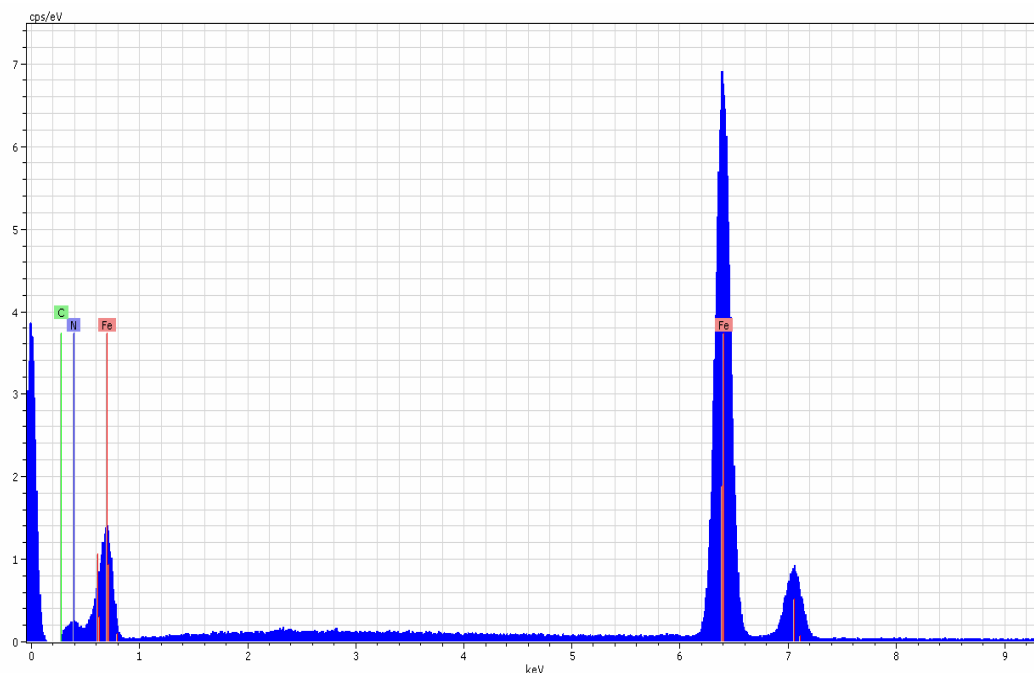
Obr. 35. *Struktura karbonitridované vrstvy. Zvětš. 500×. Leptáno $Mi1Fe$.*



2.2.2.2. Kvalitativní rentgenová mikroanalýza karbonitridovaného a sulfonitridovaného povrchu.



Obr.36. Kvalitativní mikroanalýza sulfonitridovaného povrchu.

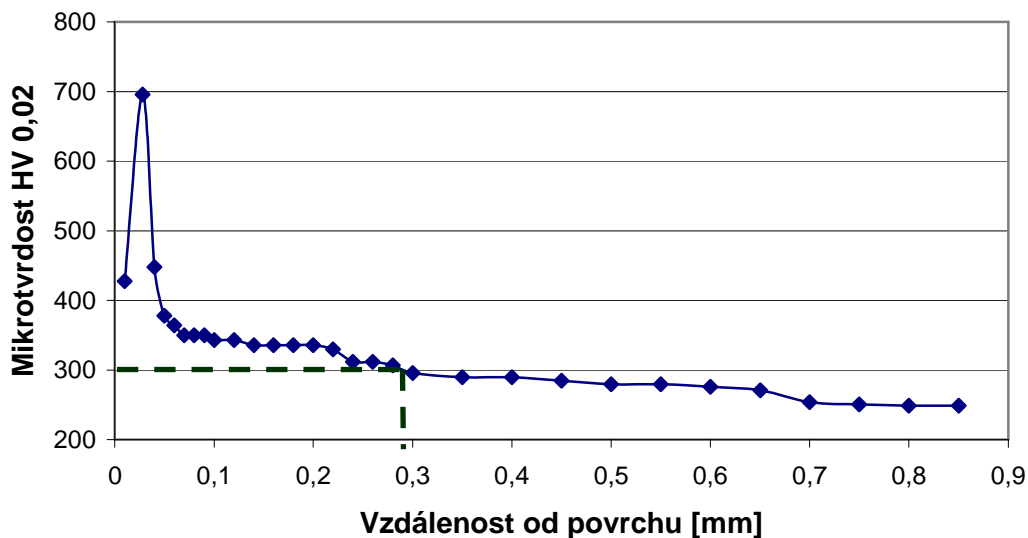


Obr.37. Kvalitativní mikroanalýza karbonitridovaného povrchu.

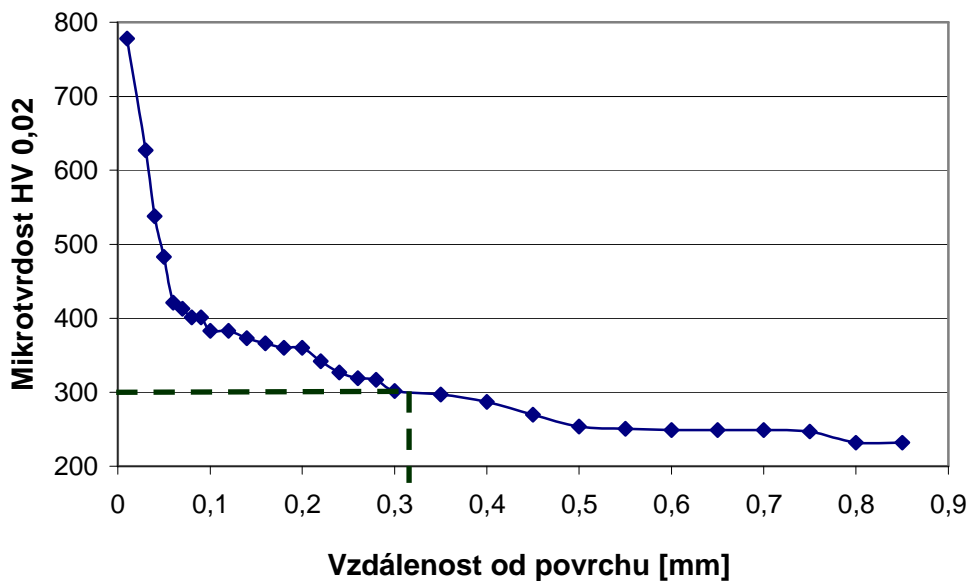


2.2.3. Zkoušky tvrdosti

Rozložení mikrotvrdosti bylo provedeno při zatížení 0,02HV. Charakterizuje mechanické vlastnosti a také efektivní tloušťku utvrzené vrstvy. Jako kritérium tloušťky vrstev byla přijata tvrdost 300HV. Níže je znázorněno rozložení mikrotvrdosti a zároveň výsledky měření efektivní tloušťky zkoušených vrstev.



Obr. 38. Rozložení mikrotvrdosti sulfonitridované vrstvy

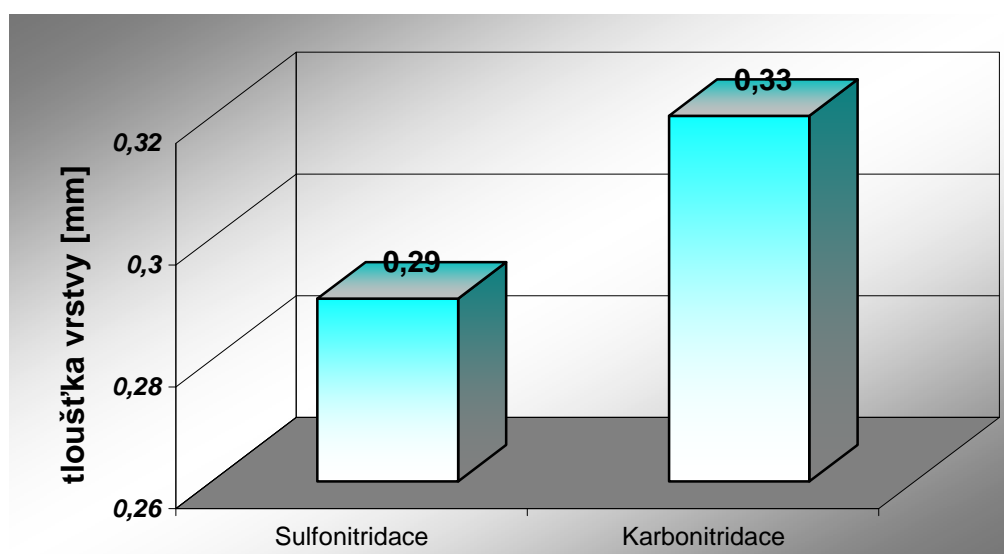


Obr. 39. Rozložení mikrotvrdosti karbonitridované vrstvy.



Tab.8. *Tloušťky získaných vrstev po procesech sulfonitridace a karbonitridace*

Typ modifikace	Karbonitridace	Sulfonitridace
<i>Tloušťka bílé zóny [mm]</i>	0,02	0,03
<i>Tloušťka zóny vyloučení nitridů ve feritu [mm]</i>	0,31	0,26



Obr.40. *Výsledky měření tloušťky vrstev.*

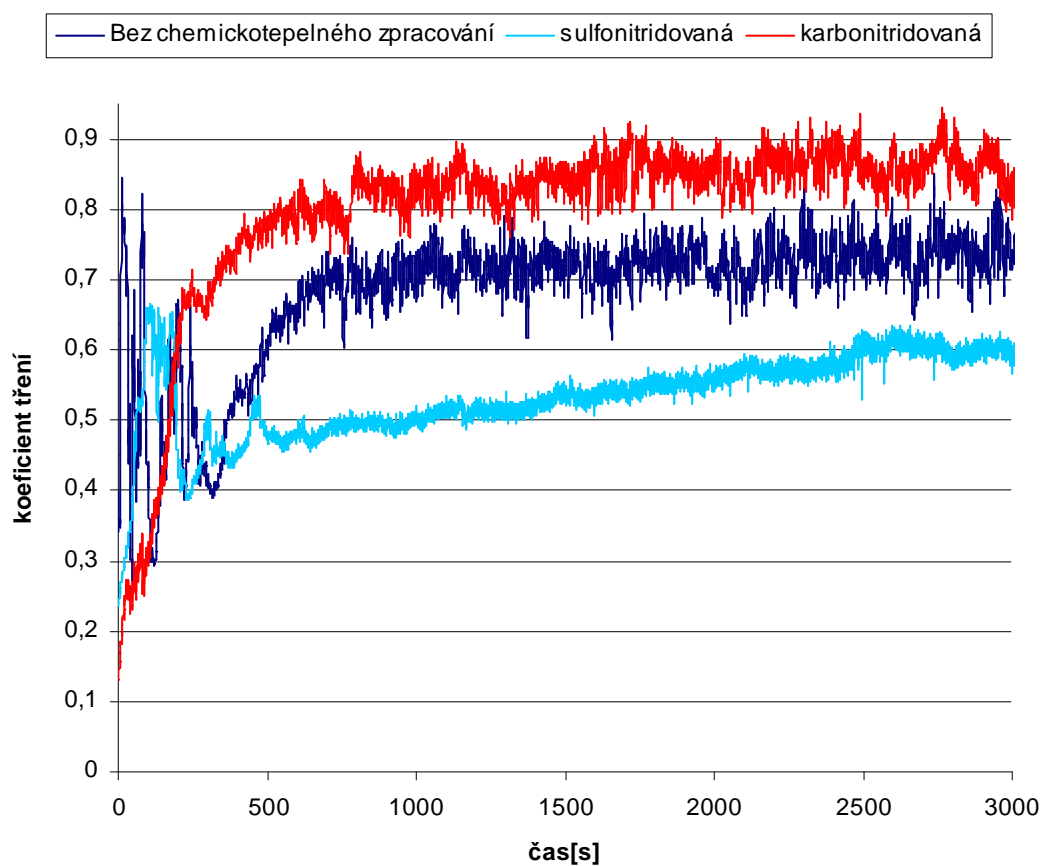
2.2.4. Tribologické zkoušky

V představeném experimentu byly provedeny zkoušky tření na zařízení T11 vyrobeném v Institutu provozní technologie. Úlohu vnikacího tělíska splnil ocelový váleček C45 podle polské normy PN – EN 10083-1:2006, dle české ČSN – EN 10083-1, který byl následně podroben karbonitridaci. Vzorky ve tvaru kotouče o rozměrech $\varnothing 25 \times 6 \text{ mm}$ byly zhotoveny z konstrukční oceli k cementování podle normy PN – EN 10084:2002 a také ČSN – EN 10084-1 a byly podrobeny procesům sulfonitridace a karbonitridace. Parametry provedeného pokusu znázorňuje tabulka 8. Výsledky testu znázorňuje obrázek 37. Po testu Pin-On-Disk bylo provedeno zvážení vzorků za účelem porovnání úbytku jednotlivých vrstev. Výsledky hmotnostního úbytku znázorňuje tabulka 9.



Tab.9. Parametry testu Pin-On-Disc

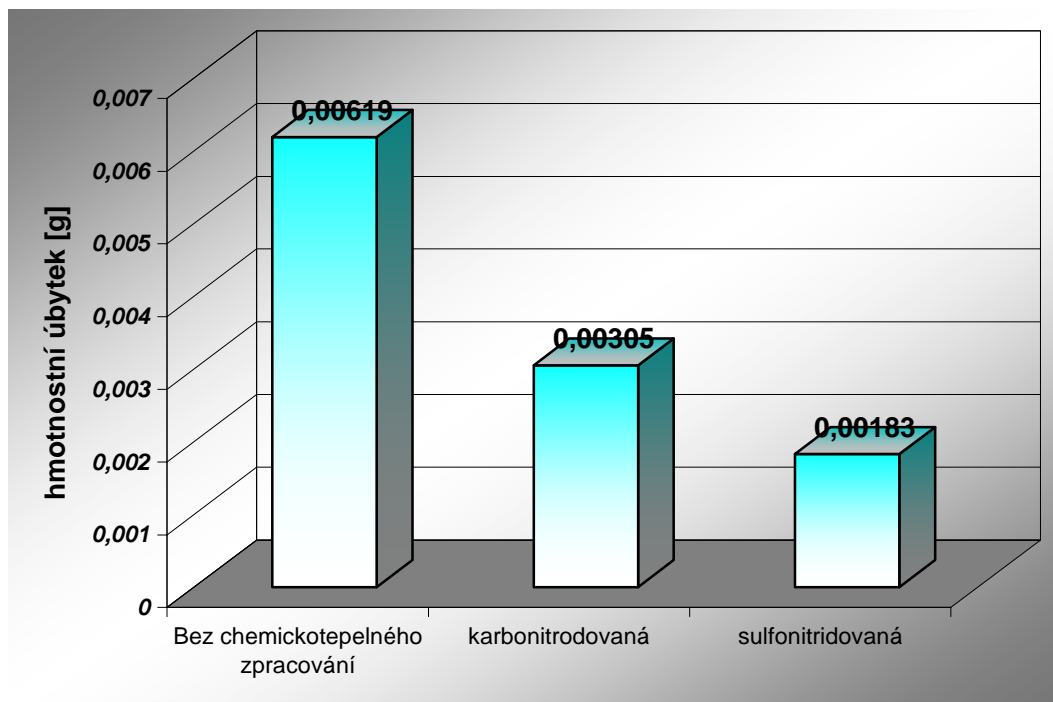
Zatížení	5N
Rychlost tření	0,1ms ⁻¹
Dráha tření	300m



Obr.41. Průběh změn koeficientu tření v čase.

Tab.10. Hmotnostní úbytky vzorků.

	Hmotnost vzorku před procesem tření	Hmotnost vzorku po procesu tření	Hmotnostní úbytek
Bez zpracování chemickotepelného	23,03376g	23.02757g	0,00619g
Vzorek sulfonitridovaný	23,06333g	23,06150g	0,00183g
Vzorek karbonitridovaný	23,17767g	23,17462g	0,00305g



Obr.42. Výsledky zkoušek odolnosti proti úbytkům sulfonitridovaných a karbonitrdovaných vrstev



III. Diskuze k výsledkům.

Metalografické zkoušky prokázaly pravidelnou strukturální stavbu sulfonitridovaných vrstev na cementované oceli, tzn. od povrchu se vyskytuje zóna vnější sulfidace, dále máme oblast výskytu nitridů ϵ s vměstkami FeS a také samotné čisté zóny nitridových sloučenin ϵ bez vměstků sulfidů FeS. Výše popsané sloučeniny společně tvoří tzv. bílou zónu. Když postupujeme směrem k jádru, zpozorujeme vyloučení nitridů γ' (obr.33.). V karbonitridované vrstvě můžeme zpozorovat od povrchu bílou zónu, s postupem dále směrem k jádru je viditelná zóna vyloučení nitridů ve feritu. Tloušťky bílé zóny měřené metalograficky pro sulfonitridovaný a karbonitridovaný vzorek činí následně 30 μ m a 23 μ m

Kvalitativní rentgenová mikroanalýza potvrdila, že analyzovanými vrstvami jsou vrstvy po sulfonitridaci a také po karbonitridaci. Tato mikroanalýza prokázala výskyt síry a dusíku na povrchu sulfonitridovaného vzorku (obr.36), a na karbonitridovaného povrchu výskyt dusíku a uhlíku (obr.37).

Na základě rozložení mikrotvrdosti sulfonitridovaného vzorku pozorujeme povrchovou tvrdost mající 428 HV0,02, která je nižší od nejvyšší změřené hodnoty mající 696 HV0,02, zpozorované ve vzdálenosti 28 μ m od okraje vzorku. Tvrdost jádra činí 249HV. Tato vlastnost je výhodná, protože díky ní je usnadněno zaběhnutí spolupracujících součástí na začátku jejich práce, po čemž funkci proti zadření přebírá zóna nitridových sloučenin s nejvyšší tvrdostí. Na základě rozložení mikrotvrdosti karbonitridovaného vzorku pozorujeme maximální povrchovou tvrdost 728 HV0,02, která mírně klesá na hodnotu tvrdosti jádra mající 237 HV0,02. Rozložení mikrotvrdosti nám rovněž dovolilo změřit efektivní tloušťku získaných difusních vrstev. Pro sulfonitridovaný vzorek tloušťka činí 0,29mm a pro karbonitridovaný vzorek 0,33mm.

Výsledky tribologických zkoušek prokázaly, že sulfonitridovaná vrstva se vyznačuje nejmenším koeficientem tření ze všech zkoušených vrstev. Po analýze koeficientu tření můžeme usoudit, že sulfonitridovaná vrstva vykazuje velmi dobré mazací vlastnosti. Hmotnostní úbytek prokázal nejmenší úbytek hmotnosti pro sulfonitridovaný vzorek mající 0,00183g, dále pro karbonitridovaný vzorek 0,00305g a pro vzorek bez vrstvy hmotnostní úbytek činil 0,00619g



IV. Závěry

Cílem mé práce bylo provedení technické analýzy možnosti zastoupení procesu karbonitridace procesem sulfonitridace za účelem zmenšení třecích odporů a zároveň zvětšení životnosti spolupracujících součástí.

Práce se skládá z teoretické části, ve které byla představena analýza některých procesů chemickotepelného zpracování používaných za účelem zlepšení užitkových vlastností povrchové vrstvy a také seznámení se se základními procesy opotřebení vzájemně spolupracujících součástí. Také bylo uvedeno několik technicko-ekonomicko-ekologických hledisek procesu sulfonitridace v plynu.

Ve druhé části práce byly provedeny procesy sulfonitridace a karbonitridace náboje synchronizátoru používaného v převodové skříní MQ 200. Následně byly zkoumány získané vrstvy za účelem charakterizace jejich strukturální stavby a také mechanických a tribologických vlastností.

Pozorování metalografických struktur bylo provedeno na Technické univerzitě v Liberci pomocí optického mikroskopu firmy EPIPHOT 200 (NIKON), získaná pozorování byla představená na fotografiích (podkapitola 2.2.2.1). Rentgenová mikroanalýza zkoušených vrstev byla provedená v laboratoři závodu Škoda Auto - Mladá Boleslav na skenovacím mikroskopu firmy TESCAN s nástavcem EDS firmy QUANTAX. Výsledky zkoušek byly představeny formou grafů (podkapitola 2.2.2.3). Zkoušky mikrotvrdosti byly provedeny v Institutu materiálního inženýrství (Lodžská polytechnika) pomocí mikrotvrdoměru SOPLOLEM, výsledky zkoušek byly prezentovány formou grafů, měření tloušťky vrstev byly představeny formou sloupcových grafů (podkapitola 2.2.3). Tribologické zkoušky byly provedeny na tribotesteru T -11 v Lodži. Zkušební materiál nebyl ze stejného materiálu jako náboj synchronizátoru v převodové skříní MQ 200. Vzorky ve formě kotouče o rozměrech $\varnothing 25 \times 6 \text{ mm}$ byly zhotoveny z konstrukční oceli k cementaci podle normy PN – EN 10084:2002 a zároveň podle ČSN – EN 10084-1. Roli vnikacího tělíska splnil váleček zhotovený z oceli C45 podle normy PN – EN 10083-1:2006, dle české ČSN – EN 10083-1. Výsledky třecích testů byly představeny formou grafů (podkapitola 2.2.2.4). V rámci této práce nebyly provedeny zkoušky v provozních podmínkách, v další etapě výzkumu je naváděno k provedení provozních zkoušek na specializovaném pracovišti za účelem analýzy vlivu použitého chemickotepelného zpracování na životnost spolupracujících součástí.



VI. Seznam obrázku a tabulek

- Rys.1** *Schéma oxidujícího opotřebení*
- Rys.2** *Schéma vodíkového opotřebení*
- Rys.3** *Možné mechanismy působení tvrdých částek s povrchem materiálu v procesu abrazivního opotřebení*
- Rys.4** *Mikrodeformace v tribologických oblastech během únavového opotřebení*
- Rys.5** *Fotografie výsledků a podoby opotřebení pittingem*
- Rys.6** *Pitting - schéma vzniku zárodků a propagace prasknutí povrchní vrstvy ve tvaru normální (dlouhodobové) stykové únavy*
- Rys.7** *Pitting – schéma vzniku zárodků a propagace prasknutí povrchní vrstvy ve tvaru katastrofické stykové únavy*
- Rys.8** *Hlava kolejnice opotřebená skrze spalling*
- Rys.9** *Fotografie výsledků a podoby adhezního opotřebení*
- Rys.10** *Schéma cyklu jevů vyvolávajících proces zadírání způsobený nekontrolovaným přirůstem teploty*
- Rys.11** *Typické rozmístění přístrojů k nitridování metodou NITREG*
- Rys.12** *Svislý pec pro plynové nitridování NITREG*
- Rys.13** *Vodorovný pec pro plynové nitridování NITREG*
- Rys.14** *Schéma pece pro plazmové nitridování*
- Rys.15** *Hlubinné pece vyrobené v Elterma S.A*
- Rys.16** *Technologická struktura povrchní vrstvy na plynovo sulfonitridovaných součástech*
- Rys.17** *Hlubinný pec k sulfonitridaci*
- Rys.18** *Převodová skříň MQ200:5MT*
- Rys.19** *Vstupní hřídel převodovky MQ 200*
- Rys.20** *Synchronizační spojka*
- Rys.21** *Konstrukce synchronizátora použitého v převodové skříní MQ 200 (Škoda Fabia)*
- Rys.22** *Jádro synchronní spojky*
- Rys.23** *Schéma pracoviště sulfonitridace*
- Rys.24** *Karuselová pec pro karbonitridaci v plynu*



- Rys.25** *Pracoviště optické mikroskopie*
- Rys.26** *Pracoviště měření mikrotvrdosti*
- Rys.27** *Tester T-11 pro tribologické zkoušky pomocí metody PIN-ON-DISK*
- Rys.28** *Pracoviště skenovací mikroskopie firmy Tescan, a adaptéru EDS firmy QUANTAX*
- Rys.29** *Schéma pracoviště měření opotřebení jádra synchronní spojky*
- Rys.30** *Části vystavené procesu sulfonitridace a karbonitridace*
- Rys.31** *Struktura jádra Zvětš. 500×. Leptáno Mi1Fe*
- Rys.32** *Struktura sulfonitridované vrstvy. Zvětš. 200×. Leptáno Mi1Fe*
- Rys.33** *Struktura sulfonitridované vrstvy. Zvětš. 500×. Leptáno Mi1Fe*
- Rys.34** *Struktura karbonitridované vrstvy. Zvětš. 200×. Leptáno Mi1Fe*
- Rys.35** *Struktura karbonitridované vrstvy. Zvětš. 500×. Leptáno Mi1Fe*
- Rys.36** *Kvalitativní mikroanalýza sulfonitridovaného povrchu*
- Rys.37** *Kvalitativní mikroanalýza karbonitridovaného povrchu*
- Rys.38** *Rozložení mikrotvrdosti sulfonitridované vrstvy*
- Rys.39** *Rozložení mikrotvrdosti karbonitridované vrstvy*
- Rys.40** *Výsledky měření tloušťky vrstev*
- Rys.41** *Průběh změn koeficientu tření v čase*
- Rys.42** *Výsledky zkoušek odolnosti proti úbytkům sulfonitridovaných a karbonitridovaných vrstev*
-
- Tab.1** *Srovnání technologií plynového nauhličování s vakuovým nauhličováním*
- Tab.2** *Vlastnosti nitridovaných vrstev*
- Tab.3** *Rozměr retorty pecí pro sulfonitridace*
- Tab.4** *Technicko-ekonomická a ekologická analýze procesu plynové sulfonitridace*
- Tab.5** *Chemické složení [%] konstrukční oceli určené na náboje synchronizátoru převodové skříně MQ 200*
- Tab.6** *Parametry zadané během sedimentace sulfonitridovaných vrstev*
- Tab.7** *Parametry zadané během sedimentace karbonitridovaných vrstev*
- Tab.8** *Tloušťky získaných vrstev po procesech sulfonitridace a karbonitridace*
- Tab.9** *Parametry testu Pin-On-Disc*
- Tab.10** *Hmotnostní úbytky vzorků*



V. Použitá Literatura

- [1] P. Kula „*Inżynieria Warstwy wierzchniej*“ Monografie Łódź 2000
- [2] Z. Gawroński „*Technologiczna warstwa wierzchnia w kołach zębatych i mechanizmach krzywkowych*“ Politechnika Łódzka Monografie 2005
- [3] L. Jewgenij, T. Budzynowski, Gjulihandanow „*Nawęglanie, Węgloazotowanie, Azotowanie stali: zagadnienia wybrane*“ Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. Radom 2003.
- [4] R. Pietrasik, Adam. Rzepkowski, Antoni Rzepkowski, T. Przygoński, J. Stodolny „*Technologia i nowoczesne wyposażenie do procesu azotonasiarczania*” XI seminarium Seco/Warwick Świebodzin 2007r.
- [5] Z. Lawrowski „*Tribologia tarcie, zużywanie i smarowanie*” Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 1993r.
- [6] Internetowy artykuł:
URL<<http://www.tribologia.org/ptt/try/tr.htm>> : 15.03.2008 ;15: 25
- [7] Internetowy artykuł : URL <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bpl/pol/02-applications/01-wear-tribology/indexW3DnavidW263.php>> :12.03.2008: 18:12
- [8] L.A. Dobrzański., „*Metaloznawstwo z podstawami nauki o materiałach*” Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa 1999r.
- [9] Krzysztof Widanka, Włodzimierz Dudziński „*Nawęglanie próżniowe stali*“ Inżynieria materiałowa 5/1999
- [10] Kula P., Rzepkowski A., Siniarki D., Kasiński A., Górecki M., „*Postęp technologii nawęglania*“ Inżynieria materiałowa 3/2000
- [11] Internetowy artykuł URL <<http://www.4metal.pl/artykuly/kontrolowane-azotowanie-gazowe-nitreg%c2%ae/>> : 09.04.2008 ; 15:30
- [12] artykuł internetowy URL
<http://www.nitrex.com/english/equipment_turnkey.htm#Typical> : 6.04.2008r: 21:23
- [13] Kula.P „ *Obróbka cieplno-chemiczna w próżni – perspektywy rozwoju*” Inżynieria materiałowa 5/1999.
- [14] Internetowy artykuł
URL<http://subskrypcja.mpl.pl/www_mpl/publikacje/MPL_APEX.pdf> :09.04.2008; 20:00



- [15] Internetowy artykuł
URL<http://www.elterma.com.pl/pl/produkty/Urzadzenia_do_obrobki_cieplnej.html>; 11.04.2008; 12:05
- [16] Internetowy artykuł
URL< <http://www.paiz.gov.pl/index/?id=4ca82782c5372a547c104929f03fe7a9>> : 11.04.2008; 14:26
- [17] Kula.P., Pietrasik R., : „Zastosowanie technologii azotonasiarczania gazowego w energetyce” VII Konferencja Naukowo – Techniczna Elektrownie ciepłe. Bełchatów 2005r.
- [18] Internetowy artykuł
URL< <http://www.secwarwick.com.pl/2/273/pl/zalety-piecow-prozniowych>> : 11.04.2008; 13:15
- [19] Artykuł internetowy
URL< http://www.sprawynauki.waw.pl/?section=article&art_id=1564> : 13.04.2008; 10:55
- [20] Artykuł internetowy
URL < <http://www.skoda-auto.pl/wiadomosci/wiadomosc.htm?840>>: 4.05.2008; 22:43
- [21] Artykuł internetowy
URL < www.inovace-dmt.fs.cvut.cz/studijni_materialy/6.10.2006_MHP.ppt>: 6.05.2008; 13:18
- [22] Artykuł internetowy
URL< <http://skoda.panda.cz/clanek.php3?id=436>>: 10.05.2008; 19:56
- [23] Artykuł internetowy
URL< http://szymkrzysztof.republika.pl/uklad_napedowy.html>: 12.05.2008; 21:32
- [24] Artykuł internetowy
URL<<http://www.aichelinusa.com/Rotary%20hearth%201.htm>> : 15.05.2008; 15:30
- [25] Artykuł internetowy
URL < <http://www.tribologia.org/ptt/inst/rad/ITeE-PIB.htm>>: 15.05.2008; 15:37